

Vanessa Fernandes Cesari

**INFLUÊNCIA DO USO DE ADITIVOS DISPERSANTES EM  
PASTAS DE GEOPOLÍMERO PRODUZIDO COM CINZA  
VOLANTE E HIDRÓXIDO DE SÓDIO**

Dissertação de Mestrado submetida ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, da Universidade  
Federal de Santa Catarina, como parte  
dos requisitos para obtenção do Título  
de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Wellington  
Longuini Repette.

Florianópolis  
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de  
Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Cesari, Vanessa Fernandes

Influência do uso de aditivos dispersantes em pastas de  
geopolímero produzido com cinza volante e hidróxido de  
sódio / Vanessa Fernandes Cesari; orientador,  
Wellington Longuini Repette - Florianópolis, SC, 2015  
128 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Geopolímeros. 2. Cinza Volante. 3. Ativação alcalina.  
4. Aditivos Dispersantes. I. Repette, Wellington Longuini.  
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Vanessa Fernandes Cesari

**INFLUÊNCIA DO USO DE ADITIVOS DISPERSANTES EM  
PASTAS DE GEOPOLÍMERO PRODUZIDO COM CINZA  
VOLANTE E HIDRÓXIDO DE SÓDIO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 23 de Fevereiro de 2015.

---

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Ph.D.  
Coordenador do PPGEC

---

Prof. Wellington Longuini Repette, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Philippe Jean Paul Gleize, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Adriano Michael Bernardin, Dr.  
Universidade do Extremo Sul Catarinense

---

Prof.<sup>a</sup> Janaíde Cavalcante Rocha, Dr.-Ing.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Este trabalho é todo dedicado aos meus pais, Zeca e Carina, com todo o amor do mundo. Cada frase, cada parágrafo.



## **AGRADECIMENTOS**

Muitas pessoas e instituições foram essenciais para o desenvolvimento desse trabalho e gostaria de aproveitar este espaço para agradecê-las.

O mais importante dos agradecimentos vai para meus pais, Zeca e Carina, e minha irmã, Gabriela, que fizeram falta durante todos os dias durante este período.

Agradeço também ao meu noivo, Rodrigo, por ser minha companhia para absolutamente tudo e meu porto seguro longe de casa.

Agradeço aos meus amigos que, mesmo estando, em sua maioria, 800 km longe, se fizeram presentes durante este período.

Agradeço também ao meu orientador, Prof. Dr. Wellington, que me guiou nessa trajetória, e aos demais membros da banca, os Prof. Dr. Philippe e Adriano e a Prof. Dr.-Ing. Janaíde pelas contribuições para com o trabalho e por aceitarem o convite para participar da avaliação do mesmo.

Da mesma forma, agradeço aos colegas da Pós-Graduação e, principalmente, ao bolsista de Iniciação Científica, Lurian, pela companhia no laboratório e pela colaboração com o desenvolver deste trabalho.

Devo um muito obrigado também ao químico responsável pelo laboratório do grupo NANOTEC, Nilton, aos funcionários do LMCC, Luiz, Renato e Roque pela ajuda no decorrer do desenvolvimento do programa experimental. E também à Mari e à Priscila da secretaria do PPGEC pela colaboração com a parte burocrática do Mestrado.

Agradeço ao CNPq pelo indispensável apoio financeiro fornecido, à Tractebel Energia pela cinza volante doada e à GRACE Construction Products, representada pelo Eng. Denis Weidmann, que se interessou pela pesquisa e doou os aditivos utilizados no programa experimental.





## RESUMO

Geopolímeros são materiais alternativos ao uso do cimento Portland originados a partir da polimerização inorgânica de minerais aluminossilicatos em ambiente altamente alcalino. Porém, devido à sua baixa trabalhabilidade e pega rápida, sua moldagem e aplicação são dificultadas. Uma possível solução para este problema é a incorporação de aditivos dispersantes na mistura, porém seu comportamento em geopolímeros ainda não foi amplamente estudado, justificando a importância da avaliação da sua influência nas propriedades do material. Neste trabalho avaliou-se a influência do uso de aditivos à base de lignossulfonato de sódio e policarboxilato de sódio no espalhamento e na resistência mecânica de pastas de geopolímero à base de cinza volante ativada com solução de hidróxido de sódio através dos ensaios de miniabatimento e determinação da resistência à flexão e da resistência à compressão em corpos de prova prismáticos com 1 e 28 dias de idade que passaram por cura térmica a 65° C. As variáveis foram a concentração molar da solução ativadora de hidróxido de sódio (8M e 12M), a relação entre a solução ativadora e a cinza volante (S0,50; S0,55 e S0,60 em massa), o tipo de aditivo (lignossulfonato e policarboxilato) e o seu teor (0,2; 0,8 e 1,2% em relação à massa de cinza volante). Percebeu-se uma tendência ao aumento do espalhamento com o aumento da relação entre solução ativadora e cinza volante e com a redução da concentração molar da solução. De modo geral, o lignossulfonato teve melhor desempenho ao fluidificar as pastas do que o policarboxilato, que reduziu o espalhamento de todas as misturas. No entanto, o bom desempenho do lignossulfonato só foi observado nas pastas com solução ativadora a 8M. As pastas apresentaram, em sua maioria, evolução da resistência mecânica do 1º ao 28º dia, principalmente aquelas com solução ativadora a 12M. Maiores resistências foram observadas em misturas com solução mais concentrada e menor relação solução ativadora/cinza volante. Quanto ao efeito dos aditivos, as pastas com policarboxilato tiveram, em sua maioria, melhor desempenho mecânico do que as pastas com lignossulfonato, que, por sua vez, tiveram sua resistência prejudicada pela presença do aditivo em relação à referência.

**Palavras-chave:** geopolímero, ativação alcalina, aluminossilicato, cinza volante, hidróxido de sódio, superplastificante, lignossulfonato, policarboxilato.



## ABSTRACT

Geopolymers are alternative materials to Portland cement originated from the inorganic polymerization of aluminosilicate minerals in highly alkaline environment. As a solution for its low workability and rapid setting that difficult molding and applying it, dispersant admixtures may be introduced into the mixture. However, the use of admixtures in geopolymers has not yet been widely studied, so it's important to evaluate the influence of using them in geopolymer properties. This Master's Thesis reports the evaluation of using sodium lignosulfonate and sodium polycarboxylate-based admixtures on the spread and mechanical strength of fly ash-based geopolymer activated by sodium hydroxide. Spread was evaluated by mini slump tests. As for the measure of mechanical strength, prismatic specimens (4 x 4 x 16 cm) were submitted to flexural and compression strength tests after 1 and 28 days submitted to curing at 149° F. The varying factors were the molar ratio of sodium hydroxide solution (8M and 12M), the ratio of activator solution-to-fly ash (S0.50, S0.55 and S0.60 by weight), the type of admixture used (lignosulfonate and polycarboxylate-based) and its content (0.2, 0.8 and 1.2%wt of fly ash). A tendency to increase the spreading while increasing the ratio of activator solution-to-fly ash and while reducing the molar ratio of the activator solution was noticed. In general, the lignosulfonate-based admixture improved the spread of the mixtures containing 8M activator solution, while the polycarboxylate-based decreased the spread of all pastes. The majority of the mixtures exhibited significant gains in flexural and compression strength from the 1st to the 28th day of age, mostly in the mixtures containing 12M activator solution. The mechanical strength seems to increase as the molar ratio of activator solution is higher and the activator solution-to-fly ash ratio is lower. In terms of compressive strength, polycarboxylate-based showed a better performance over lignosulfonate-based admixture, which, in turn, reduced the compressive strength of mostly of pastes comparing to the mixtures without admixture.

**Keywords:** geopolymers; paste; fly ash; sodium hydroxide; tensile strength; compressive strength.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Modelo conceitual de geopolimerização. ....	33
Figura 2	Exemplos de anéis geopoliméricos ativados com hidróxido de sódio.....	34
Figura 3	Esquema dos polímeros de naftaleno sulfonado (NS) e a sua repulsão eletrostática.....	38
Figura 4	Esquema dos poliacrilatos (PA) e a sua repulsão estérica.....	38
Figura 5	Esquema contendo todas as misturas confeccionadas no programa experimental.....	49
Figura 6	Distribuição das porcentagens retidas: cinza volante não moída (CV), cinza volante moída (CVm) e cimento CP V – ARI (CP V).....	51
Figura 7	Agitador mecânico a) equipamento; b) haste <i>cawles</i> .....	57
Figura 8	Moldes prismáticos a) envelopados em filme PVC; b) protegidos com vidro e plástico.....	58
Figura 9	Estufa microprocessada com ventilação a) parte externa; b) parte interna com os moldes. ....	58
Figura 10	Molde cilíndrico de interior cônico. ....	59
Figura 11	Ensaio de resistência à flexão. ....	61
Figura 12	Ensaio de resistência à compressão. ....	62
Figura 13	Resultados da manutenção do espalhamento das misturas de traço 8MS0,50. ....	64
Figura 14	Resultados da manutenção do espalhamento das misturas de traço 8MS0,55. ....	65
Figura 15	Resultados da manutenção do espalhamento das misturas de traço 8MS0,60. ....	65
Figura 16	Resultados da manutenção do espalhamento das misturas de traço 12MS0,50. ....	66
Figura 17	Resultados da manutenção do espalhamento das misturas de traço 12MS0,55. ....	66
Figura 18	Resultados da manutenção do espalhamento das misturas de traço 12MS0,60. ....	67
Figura 19	Resultados do espalhamento inicial das misturas de traço 8MS0,50.....	68
Figura 20	Resultados do espalhamento das misturas de traço 8MS0,50 após 30 min.....	68
Figura 21	Resultados do espalhamento das misturas de traço 8MS0,50 após 60 min.....	68
Figura 22	Resultados do espalhamento inicial das misturas de traço 8MS0,55.....	69

Figura 23	Resultados do espalhamento das misturas de traço 8MSO,55 após 30 min. ....	69
Figura 24	Resultados do espalhamento das misturas de traço 8MSO,55 após 60 min. ....	69
Figura 25	Resultados do espalhamento inicial das misturas de traço 8MSO,60.....	70
Figura 26	Resultados do espalhamento das misturas de traço 8MSO,60 após 30 min. ....	70
Figura 27	Resultados do espalhamento das misturas de traço 8MSO,60 após 60 min. ....	70
Figura 28	Resultados do espalhamento inicial das misturas de traço 12MSO,60.....	71
Figura 29	Resultados do espalhamento das misturas de traço 12MSO,60 após 30 min. ....	71
Figura 30	Resultados do espalhamento das misturas de traço 12MSO,60 após 60 min. ....	71
Figura 31	Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço 8MSO,50.....	76
Figura 32	Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço 8MSO,55.....	76
Figura 33	Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço 8MSO,60.....	77
Figura 34	Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço 12MSO,50.....	77
Figura 35	Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço 12MSO,55.....	78
Figura 36	Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço 12MSO,60.....	78
Figura 37	Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço 8M.....	81
Figura 38	Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço 12M.....	81
Figura 39	Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço S0,50. ....	83
Figura 40	Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de S0,55. ....	83
Figura 41	Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço S0,60. ....	84
Figura 42	Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço 8MSO,50. ....	85

Figura 43	Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço 8MS0,55.....	85
Figura 44	Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço 8MS0,60.....	86
Figura 45	Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço 12MS0,50.....	86
Figura 46	Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço 12MS0,55.....	87
Figura 47	Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço 12MS0,60.....	87
Figura 48	Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço 8M.....	90
Figura 49	Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço 12M.....	91
Figura 50	Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço S0,50.....	92
Figura 51	Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço S0,55.....	93
Figura 52	Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço S0,60.....	93
Figura 53	Relação entre a resistência à flexão e compressão das pastas.....	95





## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Teores ideais que favorecem a ativação alcalina da cinza.	30
Tabela 2	Comparação entre as características físicas da cinza volante utilizada em outras pesquisas. ....	50
Tabela 3	Composição química de cinza volante. ....	52
Tabela 4	Características físico-químicas do hidróxido de sódio em escamas.....	53
Tabela 5	Principais características dos aditivos dispersantes. ....	54
Tabela 6	Composição das misturas e relações de massa entre seus constituintes.....	56
Tabela 7	Características dos corpos de prova das misturas de referência (valores médios). ....	109
Tabela 8	Características dos corpos de prova das misturas com lignossulfonato (valores médios).....	110
Tabela 9	Características dos corpos de prova das misturas com policarboxilato (valores médios). ....	111
Tabela 10	Resultados da determinação do espalhamento das misturas e sua manutenção. ....	113
Tabela 11	Resultados de resistência mecânica. ....	115
Tabela 12	Resumo da análise estatística referente à influência da idade na resistência à flexão. ....	117
Tabela 13	Resumo da análise estatística referente à influência do tipo e teor de aditivo na resistência à flexão. ....	119
Tabela 14	Resumo da análise estatística referente à influência da relação de massa entre a solução ativadora e a cinza volante (S) na resistência à flexão. ....	120
Tabela 15	Resumo da análise estatística referente à influência da concentração molar da solução ativadora (M) na resistência à flexão. ....	122
Tabela 16	Resumo da análise estatística referente à influência da idade na resistência à compressão. ....	123
Tabela 17	Resumo da análise estatística referente à influência do tipo e teor de aditivo na resistência à compressão. ....	125
Tabela 18	Resumo da análise estatística referente à influência da relação de massa entre a solução ativadora e a cinza volante (S) na resistência à compressão. ....	126
Tabela 19	Resumo da análise estatística referente à influência da concentração molar da solução ativadora (M) na resistência à compressão.....	128



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ACI	American Concrete Institute
AG	água
ANOVA	análise de variância
CP-V ARI	cimento Portland de alta resistência inicial
CV	cinza volante
dCV	densidade da cinza volante
dSA	densidade da solução ativadora
HS	hidróxido de sódio
IFA	Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen
LS	aditivo à base de lignossulfonato de sódio
M	molaridade, massa molar
mAG	massa de água
mCV	massa de cinza volante
ME	massa específica
mHS	massa de solução de hidróxido de sódio
MS	aditivo à base de melamina sulfonato
mSA	massa de solução ativadora
NANOTEC	Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em
NS	aditivo à base de naftaleno sulfonado de sódio
P	valor P
PA	aditivo à base de poliacrilato
PC	aditivo à base de policarboxilato de sódio
REF	identificação para as misturas de referência
S	relação de massa entre a cinza volante e a solução
SA	solução ativadora
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
V	volume



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>23</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	24
1.2	OBJETIVOS .....	25
1.2.1	Objetivo geral.....	25
1.2.2	Objetivos específicos.....	25
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	26
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>27</b>
2.1	GEOPOLÍMEROS .....	27
2.1.1	As matérias-primas.....	28
2.1.2	Geopolimerização .....	31
2.1.3	A influência da água na geopolimerização .....	34
2.2	ADITIVOS DISPERSANTES.....	35
2.2.1	Definição e propriedades.....	35
2.2.2	Modo de ação .....	37
2.2.3	Influência de aditivos dispersantes nas propriedades de geopolímeros .....	39
2.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	45
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>47</b>
3.1	MATERIAIS .....	50
3.1.1	Cinza volante.....	50
3.1.2	Hidróxido de sódio.....	53
3.1.3	Aditivos dispersantes.....	54
3.2	PROPORCIONAMENTO DAS MISTURAS.....	55
3.3	PREPARO DAS MISTURAS .....	56
3.3.1	Amassamento .....	56
3.3.2	Moldagem dos corpos de prova.....	57
3.3.3	Cura térmica .....	58
3.4	DETERMINAÇÃO DO ESPALHAMENTO E MANUTENÇÃO DO ESPALHAMENTO .....	59
3.5	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	60
3.5.1	Determinação da resistência à flexão .....	60
3.5.2	Determinação da resistência à compressão .....	61
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>63</b>
4.1	DETERMINAÇÃO DO ESPALHAMENTO E MANUTENÇÃO DO ESPALHAMENTO .....	64
4.2	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	75
4.2.1	Determinação da resistência à flexão .....	75
4.2.2	Determinação da resistência à compressão .....	85

<b>4.2.3 Relação entre resistência à flexão e resistência à compressão.....</b>	<b>94</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>97</b>
<b>5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>99</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>101</b>
<b>APÊNDICE I: CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVA.....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE II: RESULTADOS DE ESPALHAMENTO .....</b>	<b>113</b>
<b>APÊNDICE III: RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA... ..</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICE IV: RESUMO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA .....</b>	<b>117</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais consumido no mundo, tendo seu consumo estimado em 10 bilhões de m<sup>3</sup>/ano (GARTNER; MACPHEE, 2011). O aglomerante mais usado em misturas de concreto é o cimento Portland, cuja produção emite quase 2 bilhões de ton/ano de gás carbônico (CO<sub>2</sub>), que representa de 6 a 7% da emissão de gás carbônico no mundo (SHI; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2011).

Graças à crescente preocupação mundial sobre como reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, o interesse pelo desenvolvimento de materiais e tecnologias capazes de reduzir o impacto ambiental da produção e uso do cimento Portland e por transformar a indústria da construção em um setor mais sustentável vem crescendo no meio científico.

Um dos maiores desafios do setor industrial juntamente com setor de pesquisa é desenvolver materiais alternativos aos usados atualmente, mas com propriedades melhores, sejam elas químicas, físicas ou mecânicas, e que agredam menos o meio ambiente.

O cimento alcalino ou geopolimérico é um dos materiais alternativos ao cimento Portland cujo estudo e uso tem se intensificado nos últimos anos. Produzido por ativação alcalina de aluminossilicatos de origem natural ou industrial, o cimento geopolimérico é um material mais barato, que agride menos o meio ambiente e que pode ter um desempenho mecânico similar ou até melhor que o cimento Portland comum (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO; REVUELTA, 2009; GARCÍA-LODEIRO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2013). Ele pode ser utilizado em substituição parcial ou até total do cimento Portland (PEREIRA; SILVA; THAUMATURGO, 2006).

Suas aplicações mais importantes são na substituição de materiais cerâmicos, na forma de cimentos e concretos para a indústria da construção, como material resistente a altas temperaturas, na estabilização e imobilização de resíduos tóxicos e radioativos e na produção de materiais compósitos avançados de alta tecnologia para indústrias nuclear, farmacêutica, aeronáutica e de transporte (DAVIDOVITS, 1994; GIANNOPOULOU; PANIAS, 2007). Essas aplicações motivam a busca pela compreensão da estrutura e do comportamento desse material, para aperfeiçoar suas propriedades e incentivar seu uso (MELO, 2011).

Existem diversas fontes de minerais de aluminossilicatos, dentre elas várias são materiais residuais de outros processos, como a cinza volante. Uma das vantagens do uso da cinza volante na produção de

cimento geopolimérico é que seu beneficiamento, que pode contar ou não com uma etapa de moagem, não inclui calcinação, não gerando ainda mais gases poluentes (DAVIDOVITS, 2013).

Apesar das vantagens de agregar valor a um rejeito industrial e ser um material mais amigável ao meio ambiente (MEMON et al., 2011), é necessário avaliar o desempenho mecânico das misturas de geopolímero. Com base na literatura, pode-se dizer que, dependendo da sua composição, suas características mecânicas podem ser similares às do cimento Portland. Katz (1998) e Hardjito e Rangan (2005) obtiveram resultados satisfatórios de resistência à compressão, além de uma microestrutura compacta e sem fissuras, o que melhora seu desempenho ao ataque de ácidos ou outros agentes agressivos presentes no meio.

A geopolimerização, processo a partir do qual são desenvolvidos os geopolímeros, é uma polimerização inorgânica de minerais aluminossilicatos em meio altamente alcalino (DAVIDOVITS, 1991; DAVIDOVITS, 1999; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2005; HARDJITO; RANGAN, 2005). A partir desse processo são desenvolvidas as propriedades aglomerantes do material, que o tornam um possível substituto ao cimento Portland (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2005).

Diferentemente do que ocorre na hidratação do cimento, a água presente na mistura de geopolímero não participa da formação dos produtos resistentes, porém, sua presença é indispensável para que haja a dissolução das matérias primas. Ou seja, a água atua como meio para a ocorrência da geopolimerização (HARDJITO; RANGAN, 2005). Isso faz com que seja interessante tentar introduzir aditivos dispersantes na mistura. Os aditivos podem ser utilizados com a finalidade de diminuir a quantidade de água, mantendo a trabalhabilidade da mistura, pois a água, após o endurecimento, resulta em poros, podendo reduzir a resistência do material; ou de melhorar a trabalhabilidade da mistura, mantendo a quantidade de água presente na mesma.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O comportamento das misturas de geopolímero no estado fresco muitas vezes cria dificuldades na moldagem e aplicação deste material *in situ*. Assim como ocorre com o concreto de cimento Portland, os geopolímeros sofrem com a baixa trabalhabilidade e pega rápida, principalmente aqueles contendo silicato de sódio em sua composição, devido à alta viscosidade deste material em solução. Isso foi observado por diversos autores como Collins e Sanjayan (1999), Bakharev,



Sanjayan e Cheng (2000), Chindaprasirt, Chareerat e Sirivivatnanon (2007) e Rattanasak, Pankhet e Chindaprasirt (2011).

Para melhorar a trabalhabilidade das misturas de geopolímero, o uso de aditivos dispersantes é indicado para resolver o problema de baixa trabalhabilidade das misturas.

Os aditivos dispersantes foram desenvolvidos para atuar em misturas à base de cimento Portland, portanto seu comportamento nessas misturas é conhecido. O mesmo não acontece para as misturas geopoliméricas. Por falta de dados sobre os efeitos destes aditivos nas misturas de geopolímero, suas aplicações ainda são limitadas (RATTANASAK; PANKHET; CHINDAPRASIRT, 2011).

Atualmente existem diversas publicações envolvendo a avaliação da resistência e da durabilidade de geopolímeros e vários pesquisadores dão destaque ao uso de concreto geopolimérico à base de cinza volante na indústria de concreto. Porém, dentre as publicações disponíveis envolvendo o uso de aditivos dispersantes, poucas avaliam o efeito dos aditivos juntamente com os parâmetros de composição das misturas, como concentração da solução e relação entre a quantidade da solução ativadora e do mineral fonte de aluminossilicatos (LASKAR; BHATTACHARJEE, 2012).

Isso motivou o desenvolvimento deste trabalho, que visa avaliar o efeito dos parâmetros de composição da mistura combinados com a dosagem e o tipo de aditivo superplastificante na trabalhabilidade e resistência mecânica de pastas de geopolímero de cinza volante e hidróxido de sódio.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral desta Dissertação de Mestrado é avaliar a influência do uso de aditivos dispersantes no espalhamento e na resistência mecânica de pastas geopoliméricas de cinza volante ativadas com hidróxido de sódio.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Para atingir o objetivo geral, estipularam-se os seguintes objetivos específicos:

- (i) Avaliar a influência dos seguintes fatores no espalhamento e na resistência mecânica das misturas de geopolímero:

- a) concentração molar da solução ativadora;
  - b) relação de massa entre a solução ativadora e a cinza volante;
  - c) base química do aditivo dispersante;
  - d) teor de aditivo dispersante.
- (ii) Avaliar a influência da idade de rompimento na resistência mecânica das misturas de geopolímero.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta Dissertação tem ao todo cinco capítulos estruturados conforme se descreve.

O primeiro capítulo conta com uma breve introdução sobre a área na qual o trabalho está contido, os geopolímeros, e as justificativas para a escolha do tema. Também são expostos os objetivos geral e específicos definidos para esta pesquisa.

O capítulo dois apresenta a revisão bibliográfica redigida com base nos textos científicos lidos ao longo do desenvolver desta pesquisa. Este capítulo conta com dois itens: o primeiro item tem com ênfase nos geopolímeros de uma forma geral e o segundo item aborda os aditivos dispersantes e também expõe um apanhado de resultados de outras pesquisas feitas com geopolímeros e aditivos dispersantes.

No terceiro capítulo são apresentadas e descritas todas as etapas do programa experimental deste trabalho, contendo registros fotográficos e observações importantes para o bom andamento do mesmo e os materiais utilizados, bem como suas características.

No capítulo quatro são expostos os resultados obtidos através dos ensaios de espalhamento e determinação da resistência à flexão e à compressão nas duas idades estipuladas (1 e 28 dias) em forma de gráficos. Este capítulo também engloba discussões dos resultados com base na análise estatística feita com todos os dados obtidos.

O capítulo cinco apresenta uma síntese dos principais resultados apresentados no capítulo anterior, com o objetivo de elaborar as conclusões obtidas após a execução do programa experimental e análise dos dados obtidos. Também são feitas sugestões para trabalhos futuros.

Nos apêndices são apresentadas tabelas contendo as características de todos os corpos de prova moldados, os resultados dos ensaios de espalhamento e manutenção do espalhamento, resistência à flexão e resistência à compressão de todas as misturas e os resultados da análise estatística dos dados de resistência mecânica.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 GEOPOLÍMEROS

Entre os anos de 1970 e 1973 a França sofreu com a ocorrência de alguns incêndios no país. Isso levou os pesquisadores à percepção de que havia a necessidade de se desenvolver materiais de construção resistentes ao fogo (DAVIDOVITS, 1991). Nessa época o cientista Joseph Davidovits começou a estudar materiais inorgânicos. Estas pesquisas consistiam em analisar amostras de materiais coletados de construções muito antigas que, mesmo expostas a agentes agressivos por longos períodos de tempo, apresentavam pouco desgaste. A partir da análise destas amostras, percebeu-se que alguns dos materiais eram compostos de calcários cauliniticos e hidróxido de sódio. Análises químicas e mineralógicas revelaram a presença de material amorfo composto de aluminossilicatos nestes materiais (DAVIDOVITS, 2002a; DAVIDOVITS, 2002b). Com base nisso, Davidovits propôs que uma solução alcalina poderia ser utilizada para reagir com o silício e o alumínio presentes em materiais geológicos ou produtos residuais de outro processo industrial, como a cinza volante, a cinza de casca de arroz e a escória de alto forno, formando um produto aglomerante. O fruto destas pesquisas é o desenvolvimento dos geopolímeros que Davidovits vem estudando desde 1972 (DAVIDOVITS, 1991; DAVIDOVITS, 1999).

O termo geopolímero foi atribuído aos tecto-aluminossilicatos tridimensionais formados a partir de aluminossilicatos já existentes na natureza a baixas temperaturas e em curtos períodos de tempo por Davidovits em 1978 (DAVIDOVITS, 1999). Atualmente estes materiais são conhecidos por diversos nomes, como cerâmicas alcalinas, hidrocerâmicas, cimentos ativados alcalinamente, polímeros inorgânicos, etc. Porém, é importante salientar que em todos os casos a ativação alcalina é essencial (DAVIDOVITS, 2005). Apesar dos diversos nomes, Duxson et al. (2007) pensam que um termo mais amplo como “polímeros inorgânicos” seja o mais adequado para denominar estes materiais.

Os geopolímeros são polímeros inorgânicos à base de óxido-aluminossilicatos cuja policondensação ocorre em ambiente altamente alcalino (DAVIDOVITS, 1991). Sua composição química é muito parecida com a dos materiais zeolíticos naturais, porém sua microestrutura é amorfa (PALOMO et al., 1999; XU; VAN DEVENTER, 2000).

O produto formado na reação de policondensação está representado de forma genérica na Equação 1 a seguir (DAVIDOVITS, 1991; DAVIDOVITS, 1999):



Onde “z” é 1, 2 ou 3, “M” é o cátion do metal alcalino, “n” é o grau de policondensação e “w” é o numero de moléculas de água.

### 2.1.1 As matérias-primas

Em teoria, todo e qualquer material que contenha alumínio e silício em sua composição tem potencial para ser a fonte de aluminossilicatos para a geopolimerização. Mas as principais matérias-primas são o caulim, o metacaulim, a cinza de queima de carvão mineral (volante e pesada), pozolanas naturais, escória de alto-forno, feldspatos alcalinos, cal, cinza de casca de arroz, casca de ovo calcinada, entre outros (DAVIDOVITS, 1991).

Segundo Repette (2010), os mais utilizados são o metacaulim, a cinza volante e a escória de alto-forno. Porém Gourley<sup>1</sup> (2003) (apud HARDJITO; RANGAN, 2005) notou que, dentre estes, o metacaulim é o mais usado pelos pesquisadores na área de geopolímero devido, principalmente, à sua elevada taxa de dissolução em meio alcalino e à facilidade de controle da relação Si:Al. No entanto, para produção em grande escala, torna-se muito oneroso devido ao alto custo do metacaulim (HARDJITO; RANGAN, 2005). Desta forma, a cinza volante passa a ser a melhor opção graças ao seu baixo custo e facilidade de obtenção. Além de não necessitar de calcinação, não gerando ainda mais gases poluentes (DAVIDOVITS, 2013).

Quanto ao ativador químico, na maioria dos casos emprega-se hidróxido de sódio ou de potássio (podendo ser associados ao seu silicato ou não), óxido de cálcio ou ainda outros materiais como hidróxido de cálcio ou o próprio cimento Portland. O uso dos três últimos, inclusive, é bastante incentivado por Davidovits (2013), devido ao fato de seu manuseio ser mais seguro ao usuário, não demandando

---

<sup>1</sup> GOURLEY, J.T. Geopolymers: opportunities for environmentally friendly construction materials. *In: Materials 2003 Conference: Adaptive materials for a modern society*, Sidney, Institute of Materials Engineering Australia. 2003.

tantos equipamentos de segurança e procedimentos de segurança ao usuário quanto os demais ativadores citados.

#### 2.1.1.1 Cinza volante

A cinza volante ou cinza leve é um material residual da queima do carvão mineral e está disponível em diversas regiões do mundo, devido à ocorrência frequente de usinas termoeletricas que se utilizam da queima do carvão mineral para a geração de energia (ACI, 2003; ASTM, 2012). Suas partículas finas são transportadas juntamente com os gases de combustão de usinas termoeletricas até os filtros ou precipitadores eletrostáticos, onde são coletadas (ACI, 2000).

Uma de suas principais aplicações é como adição mineral, melhorando a trabalhabilidade das misturas cimentícias devido ao formato esférico de suas partículas, além de funcionar como material de substituição parcial ao cimento Portland nas fábricas a fim de diminuir o impacto ambiental do material (HARDJITO; RANGAN, 2005).

No ramo dos geopolímeros, a cinza volante é utilizada como fonte de aluminossilicatos, possibilitando a incorporação de agregados à pasta com ou sem o uso de aditivos (HARDJITO; RANGAN, 2005).

Quatro óxidos são os principais componentes da cinza volante: sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e cal ( $\text{CaO}$ ), mas somente os três primeiros, por serem óxidos ácidos, reagem com os álcalis do ativador químico na geopolimerização. Por isso, indica-se que a parcela de cal seja a menor possível, já que o excesso de cálcio interfere negativamente na polimerização (HARDJITO; RANGAN, 2005). Porém, as parcelas de cada um destes componentes e a composição química da cinza dependem fortemente da origem do carvão mineral da qual o material é proveniente; além dos procedimentos de coleta da mesma, dos métodos de combustão e do formato das partículas (ACI, 2003; HARDJITO; RANGAN, 2005).

Dentre os quatro óxidos, o de sílica é o principal no que diz respeito à reação de geopolimerização. Deseja-se, portanto, que este seja o óxido em maior quantidade para uma melhor resistência mecânica do material final (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2003).

Na Tabela 1 são apresentados os teores ideais de materiais constituintes da cinza volante de acordo com Fernández-Jiménez e Palomo (2003).

Tabela 1 Teores ideais que favorecem a ativação alcalina da cinza.

<b>CARATERÍSTICA</b>	<b>FAIXA IDEAL</b>
Teor de carbono (CO <sub>2</sub> )	< 5%
Teor de hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	< 10%
Teor de sílica reativa (SiO <sub>2</sub> )	40% a 50%
Porcentagem de partículas inferiores a 45 µm	80% a 90%

Dentre suas propriedades físicas, a que mais influencia no resultado final das misturas é o tamanho das partículas. Quanto menores os grãos de cinza, maior a reatividade do material e, consequentemente, maiores as taxas de dissolução e formação dos produtos (VAN JAARSELD; VAN DEVENTER; LORENZEN, 1998; HARDJITO; RANGAN, 2005).

Segundo Fernández-Jiménez e Palomo (2003), o tamanho dos grãos de cinza volante depende, fundamentalmente, do grau de pulverização do carvão mineral, bem como do processo térmico adotado e do tipo de filtro instalado no local. O diâmetro médio das partículas pode variar entre 200 e 1 µm, estando, em sua maioria, entre 10 µm e 75 µm (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2003; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2005; HARDJITO; RANGAN, 2005; PANIAS; GIANOPOULOU; PERRAKI, 2007; DIAZ-LOYA; ALLOUCHE; VAIDYA, 2011).

#### 2.1.1.2 Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio é uma substância altamente alcalina, com pH igual a 14, que se apresenta na forma de um sólido branco, higroscópico, inorgânico e solúvel em água, cuja massa molar é de 40 g/mol e o ponto de fusão é de 1390° C (IFA<sup>2</sup>, 2012 apud LIVI, 2013).

Este material, comercialmente conhecido como soda cáustica, está disponível no mercado na forma de flocos, pó ou pérolas (SHI; KRIVENKO; ROY, 2006).

O tipo de material utilizado como ativador químico e a quantidade de íons hidroxila disponível em solução após o contato com a água influenciam o desenvolvimento da resistência do geopolímero (KATZ, 1998; XU; VAN DEVENTER, 2000; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2005; HARDJITO; RANGAN, 2005). Uma

<sup>2</sup> INSTITUT FÜR ARBEITSSCHUTZ DER DEUTSCHEN GESETZLICHEN UNFALLVERSICHERUNG, IFA. **GESTIS Substance Database: Sodium Hydroxide**. Sankt Augustin, Germany, p. 19. 2012.

maior quantidade de íons hidroxila facilita a dissolução dos aluminossilicatos, aumentando o grau de polimerização da mistura (DAVIDOVITS, 1988; PHAIR et al., 2000<sup>3</sup> apud KOMNITSAS; ZAHARAKI, 2007).

Os íons hidroxila são os responsáveis pela quebra das ligações entre Si-O-Si, Si-O-Al e Al-O-Al da cinza volante, formando os grupos Si-OH e Al-OH e originando o gel aluminossilicato (VAN JAARSELD; VAN DEVENTER; LORENZEN, 1998; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2005). Desta forma, conclui-se que o aumento na concentração molar da solução resulta em geopolímeros com maior resistência mecânica (KATZ, 1998; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2005). Porém, Palomo, Grutzeck e Blanco (1999) perceberam a possível existência de uma concentração ideal a partir da qual pode ocorrer perda de resistência mecânica. O excesso de ativador possibilita a formação de carbonato de sódio em contato com o ar (KOMNITSAS; ZAHARAKI, 2007). De acordo com Santa (2012), a concentração ideal seria aquela suficiente para que ocorra o balanceamento das cargas de  $\text{Si}^{4+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  nos tetraedros.

Segundo Komnitsas e Zaharaki (2007), o tamanho do cátion também influencia no sistema. O cátion de sódio, por ser menor que o cátion de potássio, por exemplo, tem menor grau de condensação. Por outro lado, o cátion de sódio, por ser menor, é capaz de migrar através da rede do gel úmido. O hidróxido de sódio aumenta a concentração de  $\text{Na}_2\text{O}$ , o que corresponde a um aumento na resistência mecânica. Isso ocorre pois a razão  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  é um parâmetro importante para a ocorrência da reação de forma satisfatória, pois a queda do  $\text{Na}_2\text{O}$  diminui o pH, interferindo na cinética da reação (OLIVIA; SARKER; NIKRAZ, 2008). Isso faz com que seja vantajoso trabalhar com o hidróxido de sódio como ativador químico.

### 2.1.2 Geopolimerização

A geopolimerização é um processo exotérmico que ocorre entre aluminossilicatos e um ativador químico altamente alcalino em meio aquoso. Esta reação se baseia na química da ativação alcalina de materiais inorgânicos (KHALE; CHAUNDHARY, 2007).

---

<sup>3</sup> PHAIR, J.W.; VAN DEVENTER, J.S.J.; SMITH, J.D. Mechanism of polysialation in the incorporation of zirconia into fly ash-based geopolymers. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 39, i. 8, p. 2925-2934, 2000.

Palomo et al. (1999) definem a ativação alcalina, de forma resumida, como um processo químico que transforma estruturas vítreas em um material cimentício compacto. As partículas do material fonte de aluminossilicatos dissolvem-se ao entrarem em contato com a solução ativadora e, então, ocorre a quebra das ligações originais da matéria-prima.

É importante mencionar que o modo exato como se dão as reações de dissolução e formação de gel dos sistemas geopoliméricos ainda são desconhecidos, porém, alguns pesquisadores formularam hipóteses sobre as etapas deste processo.

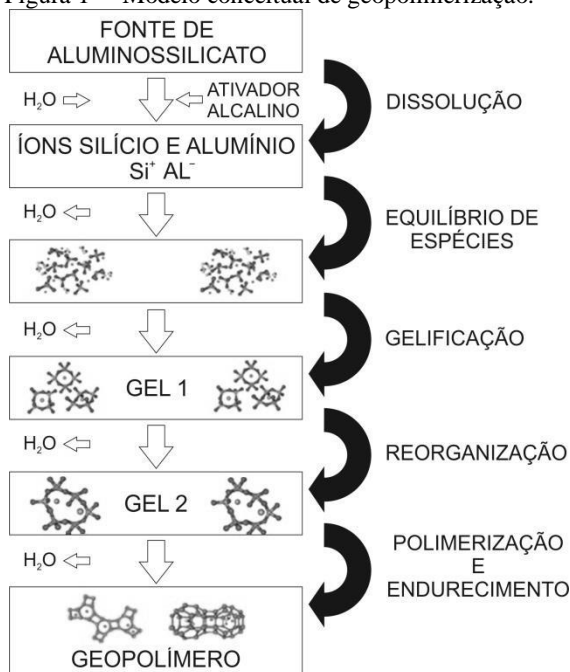
Em 1950, Glukhovsky propôs um mecanismo para o processo de ativação alcalina de materiais aluminossilicatos que, futuramente, seria nomeado geopolimerização por Joseph Davidovits.

Davidovits (1999), Xu e van Deventer (2003) dividem a geopolimerização, de forma sucinta, em algumas etapas: a dissolução dos sólidos reagentes, a transferência das espécies dissolvidas da superfície dos sólidos para uma fase gel, a reorganização, a polimerização e, finalmente, o enrijecimento do material. No entanto, estas etapas podem se sobrepor, acontecendo concomitantemente, o que torna difícil isolar e examinar cada uma separadamente (PALOMO et al., 1999).

A Figura 1 ilustra as etapas da geopolimerização, segundo Davidovits (1999), Xu e van Deventer (2003) e Duxson et al. (2007).

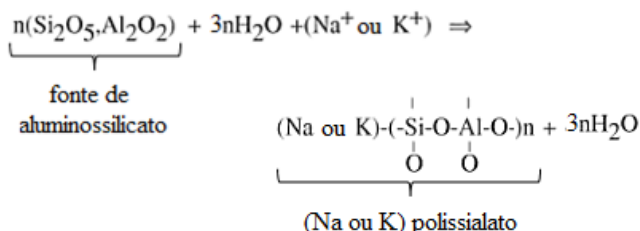


Figura 1 Modelo conceitual de geopolimerização.

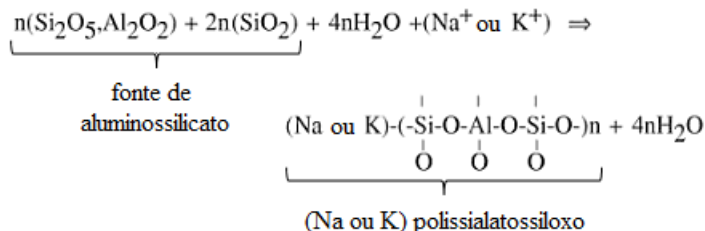


Fonte: adaptado de Duxson *et al.* (2007).

Todo este processo foi descrito, também, por Davidovits (1991) e organizado em um esquema de reações que são apresentadas nas Equações 2 e 3 para os geopolímeros polissialatos (razão Si:Al igual a 1) e para os polissialatossiloxos (razão Si:Al igual a 2), respectivamente. Exemplos dos produtos formados nestas reações são ilustrados na Figura 2.

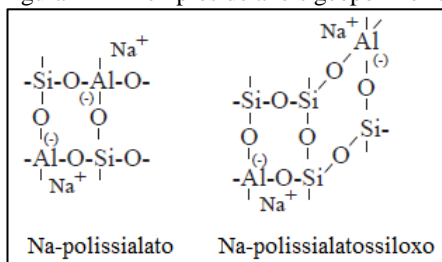


Equação 2



Equação 3

Figura 2 Exemplos de anéis geopoliméricos ativados com hidróxido de sódio.



Fonte: adaptado de Davidovits (1999).

### 2.1.3 A influência da água na geopolimerização

Observando-se o esquema ilustrado da geopolimerização (Figura 1) e também as Equações 2 e 3, com ênfase no último termo das mesmas, é possível perceber que a água não é consumida, mas sim liberada durante a formação dos geopolímeros. Ao contrário do que ocorre nas reações de hidratação do cimento Portland, onde a água participa das reações formando produtos hidratados responsáveis pelo desenvolvimento da resistência mecânica do material. A água, em uma mistura geopolimérica, portanto, não desempenha nenhum papel nas reações químicas, apenas fornece fluidez à mistura durante o seu manuseio (HARDJITO; RANGAN, 2005). Ou seja, o papel da água na geopolimerização é ser o meio no qual o ativador químico e o material aluminossilicato entram em contato. Desta forma, torna-se importante controlar a quantidade de água de forma que seu excesso ou falta não causem efeitos negativos ao material.

A água presente na mistura de um geopolímero pode afetar seu desempenho tanto de forma positiva quanto negativa. Santa (2012) reuniu informações de alguns trabalhos acerca da influência da água no

processo de geopolimerização. Os dados mais pertinentes são mostrados na sequência.

A água, quando utilizada em quantidades pequenas, pode favorecer os estágios de policondensação e endurecimento da mistura devido ao aumento do poder de ativação. Isso ocorre porque os silicatos e aluminatos presentes na reação se dissolvem mais rapidamente, acelerando a geopolimerização e favorecendo o grau de polimerização e a formação de oligômeros. Porém, deve-se atentar para o fato de que, se a quantidade de água for muito pequena, o efeito pode ser negativo, pois a água age como meio de transporte para que o reagente atinja todas as regiões do sólido. Se a água estiver em quantidades muito pequenas, algumas partes do sistema não receberão o ativador e isso irá diminuir o grau de polimerização e enfraquecer o material (PANIAS; GIANNPOULOU, 2006). Isso leva ao aumento da viscosidade e à redução da dispersão da mistura (THAKUR; GHOSH, 2009).

No entanto, o outro extremo também é prejudicial. Quando em quantidade muito elevada, a água leva à formação de cristais maiores, o que diminui a superfície específica das partículas, causando a diminuição da resistência mecânica do material devido ao aumento da porosidade do mesmo (OLIVIA; SARKER; NIKRAZ, 2008).

Com base nestas afirmações, pode-se dizer que existe uma faixa entre os dois extremos onde estaria a quantidade ideal de água, porém, as misturas geopoliméricas têm como característica a baixa trabalhabilidade. Vários autores, como Collins e Sanjayan (1999), Bakharev, Sanjayan e Cheng (2000), Chindaprasirt, Chareerat e Sirivivatnanon (2007) e Rattanasak, Pankhet e Chindaprasirt (2011), perceberam uma dificuldade na moldagem e aplicação dos geopolímeros devido à sua baixa trabalhabilidade e pega rápida. Uma possível solução para este problema é a introdução de aditivos dispersantes em misturas geopoliméricas a fim de tentar solucionar este problema.

## 2.2 ADITIVOS DISPERSANTES

### 2.2.1 Definição e propriedades

Aditivos químicos são materiais que, além da água, agregados, cimentos hidráulicos e fibras, constituem uma mistura de concreto ou argamassa e são adicionados ao misturador imediatamente antes ou durante a mistura. Estes produtos têm a função de conferir certos benefícios ao material, como resistência a sulfatos, controle da pega e endurecimento, melhora na trabalhabilidade, aumento da resistência

mecânica, entre outros (RAMACHANDRAN et al., 1998; ASTM, 2003).

Dentre a enorme variedade de aditivos químicos, estão os chamados redutores de água ou plastificantes e sua versão mais moderna e eficiente, os redutores de água de alto desempenho ou superplastificantes. Seu uso em concretos, pastas ou argamassas tem o objetivo de modificar as propriedades dos materiais cimentícios de forma a aumentar a trabalhabilidade da mistura e/ou incrementar a resistência e durabilidade do material depois de endurecido. Porém, sua principal função é melhorar a trabalhabilidade da mistura através da diminuição do atrito interno entre os diversos constituintes sólidos. Esta redução no atrito é alcançada através da dispersão das partículas da mistura que ocorre de modo diferente para cada tipo de aditivo.

Os plastificantes ou redutores de água têm a capacidade de reduzir a quantidade de água da mistura em aproximadamente 8-10% mantendo as propriedades reológicas da mistura fresca. Dentre as bases químicas possíveis para aditivos desta categoria, os principais são os lignossulfonatos. Já os superplastificantes ou aditivos redutores de água de alto desempenho são capazes de reduzir a água da mistura em até 30% e suas principais bases químicas são o formaldeído naftaleno sulfonado, o formaldeído melamina sulfonado e os policarboxilatos e poliacrilatos (RAMACHANDRAN et al., 1998).

Os aditivos à base de lignossulfonato de sódio (LS) atuam no concreto de cimento Portland dispersando as partículas, influenciando, assim, várias propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Aditivos à base de lignossulfonato de sódio geralmente oferecem uma boa manutenção de trabalhabilidade, mas tendem a retardar o tempo de pega do cimento e também incorporar ar à mistura. Os aditivos baseados em condensados de naftaleno sulfonado de sódio (NS) têm um bom comportamento com a maior parte dos cimentos Portland e sua manutenção de plasticidade pode variar de acordo com a temperatura ambiente e consumo de cimento, sendo em média de 40 minutos e só interferem no tempo de pega do cimento no caso de altas dosagens. Os aditivos à base de condensado de melamina e formaldeído (MS) podem apresentar uma tendência a retardar a pega do cimento devido à presença de melamina na sua composição. Os aditivos baseados em policarboxilatos de sódio (PC), os mais aconselhados para a utilização em concretos ou argamassas especiais, são aditivos superplastificantes de alta eficiência que dispersam e defloculam as partículas de cimento, oferecendo, assim, um efeito fluidificante muito

grande e de longa duração com pouco retardo de pega (MEHTA; MONTEIRO, 1994; MARTIN, 2005; REPETTE, 2005).

Todos estes aditivos, tanto plastificantes quanto superplastificantes, podem ser utilizados com diferentes finalidades. São elas, segundo Collepar di (1998):

- aumentar a trabalhabilidade da mistura sem alterar sua composição, a fim de facilitar o transporte, lançamento e adensamento do material;
- reduzir a água da mistura e a razão água/cimento, a fim de aumentar a resistência e melhorar a durabilidade a uma dada trabalhabilidade;
- reduzir a quantidade de água e de cimento a uma determinada trabalhabilidade, a fim de economizar cimento (o que reduz custos, além de ser mais ecologicamente correto) e reduzir fluência, retração e deformações de origem térmica causadas pelo calor de hidratação do cimento.

Porém, seu desempenho, ao exercer tais funções, está relacionado com o seu modo de ação no sistema, especialmente com o comportamento do aditivo na superfície do grão e, isso, depende essencialmente da base química do aditivo (MARTIN, 2005).

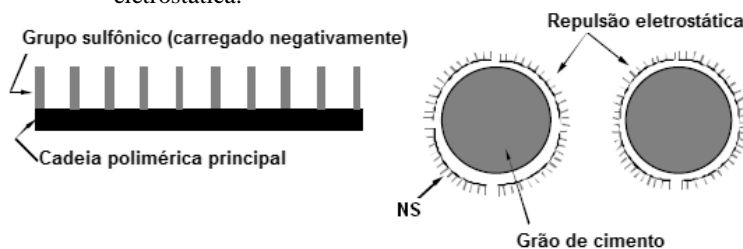
### **2.2.2 Modo de ação**

Após inúmeros anos de pesquisa acerca destes aditivos, pesquisadores discutem qual o modo de ação de cada tipo de aditivo dispersante. Inicialmente a explicação para os efeitos fluidificante e de redução de água dos aditivos era baseada no fenômeno de dispersão. Ao adsorver nos grãos de cimento, o aditivo seria capaz de deflocular rapidamente as partículas de cimento aglomeradas, liberando parte da água para fluidificar a mistura. Portanto, o teor de água poderia ser reduzido mantendo a trabalhabilidade da mistura constante (RAMACHANDRAN et al., 1998). Atualmente, a grande maioria dos pesquisadores parece concordar que os aditivos plastificantes e superplastificantes (policarboxilatos exclusivos) têm seu modo de ação com base na repulsão eletrostática. Neste caso as moléculas de aditivo adsorvem na superfície das partículas sólidas, carregando-as negativamente, causando repulsão eletrostática entre elas, provocando a defloculação e dispersão dos grãos. Já os policarboxilatos atuam contando com, além das forças eletrostáticas, forças repulsivas

originando efeitos estéricos. Neste fenômeno o polímero adsorvido (neutro ou carregado) constitui uma barreira física, impedindo o contato partícula-partícula. Para aditivos à base de policarboxilato, a repulsão estérica é dominante sobre a repulsão eletrostática (COLLEPARDI, 1998; RAMACHANDRAN *et al*, 1998; COLLEPARDI, 2003; JOLICOUER *et al.*, 2003).

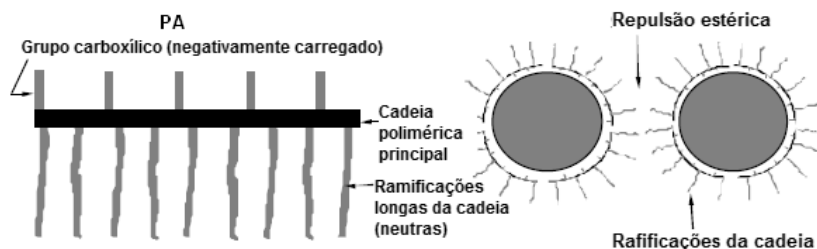
Estes fenômenos são apresentados de forma esquemática nas Figuras 3 e 4.

Figura 3 Esquema dos polímeros de naftaleno sulfonado (NS) e a sua repulsão eletrostática.



Fonte: Adaptado de Collepari (2003).

Figura 4 Esquema dos poliacrilatos (PA) e a sua repulsão estérica.



Fonte: Adaptado de Collepari (2003).

Assim como acontece com o concreto, os geopolímeros à base de cinza volante também sofrem com sua pouca trabalhabilidade e pega rápida, principalmente aqueles que levam silicato de sódio em sua composição pois a solução de silicato de sódio em si possui uma viscosidade alta (CHINDAPRASIRT; CHAREERAT; SIRIVIVATNANON, 2007).

Para melhorar a trabalhabilidade do material, pode-se incorporar uma quantidade adicional de água à mistura (CHINDAPRASIRT;

CHAREERAT; SIRIVIVATNANON, 2007). Porém, essa prática não é indicada, uma vez que altera a concentração de hidróxido alcalino e pode diminuir a resistência mecânica do produto se uma grande quantidade for utilizada. Isso pode ser muito prejudicial no caso de materiais de reparo, por exemplo, que necessitam de alta resistência mecânica desenvolvida em curto período de tempo (RATTANASAK; PANKHET; CHINDAPRASIRT, 2011).

Após décadas de pesquisa sobre aditivos dispersantes e sua interação com o cimento Portland, sabe-se que todo tipo de cimento Portland responde bem à ação destes aditivos, apesar da eficiência não ser a mesma para diferentes tipos de cimento. Já, para os geopolímeros, não se pode dizer o mesmo.

Ainda não se sabe exatamente se o modo de ação dos aditivos é o mesmo para o cimento Portland e para os geopolímeros. E nem como os mesmos se comportam na presença de diferentes geopolímeros. Isso motiva o estudo da influência destes aditivos nas propriedades dos geopolímeros.

Independentemente do modo de ação, sabe-se que as partículas de aditivo tendem a formar produtos com os íons  $\text{Ca}^{2+}$  dissolvidos nas fases iniciais da hidratação do cimento Portland (CRIADO et al., 2009). Uchikawa et al. (1995) observaram que os íons de cálcio, na presença de aditivos à base de ácidos aminossulfônicos, naftalenossulfônicos ou lignossulfônicos, se ligam a esses compostos formando sulfonato de cálcio. O mesmo acontece com as moléculas de aditivos policarboxílicos, que também formam compostos com íons de cálcio (CRIADO et al., 2009).

### **2.2.3 Influência de aditivos dispersantes nas propriedades de geopolímeros**

O efeito dos aditivos dispersantes nas propriedades reológicas de concretos, argamassas e pastas de cimento Portland tem sido estudado extensivamente. Porém, seu efeito sobre outros materiais, como pastas e argamassas álcali-ativadas, ainda tem recebido menos atenção.

Os superplastificantes disponíveis no mercado não foram desenvolvidos para o uso em geopolímeros, no entanto, diversos pesquisadores têm tentado utilizá-los para melhorar a reologia destes materiais. A maioria destes aditivos parece ser degradada no meio alcalino composto pelos ativadores químicos, portanto acabam não sendo eficientes para o seu propósito em geopolímeros. Porém, ao longo dos anos, foram encontrados alguns aditivos que parecem desempenhar

satisfatoriamente sua função em misturas geopoliméricas. Isso, provavelmente, está relacionado à sua capacidade de resistir aos ataques dos ativadores alcalinos (NEMATOLLAHI; SANJAYAN, 2014b).

Na sequência será apresentado um compilado de considerações de diversos autores sobre o uso de aditivos dispersantes em misturas geopoliméricas coletadas ao longo de todo o desenvolvimento desta Dissertação.

Douglas e Barndstetr (1990) observaram que o aditivo à base de lignossulfonato de sódio utilizado em teores de 0,2; 0,5 e 1% em relação à massa de escória não só não fluidificou o geopolímero de escória ativado por silicato de sódio, como reduziu a resistência à compressão inicial (1 dia) de 11,47 MPa para 8,3; 10,8 e 7 MPa respectivamente. Também foram testados os teores de 0,5; 1; 5 e 9% de aditivo à base de naftaleno sulfonado, que, da mesma forma, reduziram a resistência à compressão com 1 dia de idade de 11,47 MPa para 9,3; 9,5; 6,8 e 4,9 MPa respectivamente. A melhora na fluidez só foi observada com 9% de aditivo à base de naftaleno sulfonado.

Bakharev, Sanjayan e Cheng (2000), investigaram o uso de 10 mL de aditivos à base de lignossulfonato de sódio e naftaleno sulfonado por quilo de escória em geopolímeros ativados com silicato de sódio e concluíram que o lignossulfonato melhorou a trabalhabilidade de todas as misturas de 55 mm para 200 mm. O mesmo ocorreu com o uso de naftaleno sulfonado, porém, a melhora foi somente inicial, com perda total de espalhamento 10 minutos depois. Quanto à resistência mecânica, o lignossulfonato de sódio atrasou o endurecimento da mistura e, consequentemente, o desenvolvimento de resistência. O naftaleno sulfonado acelerou a pega, porém, reduziu a resistência nas idades mais avançadas.

Puertas et al. (2003) investigaram o efeito de 2% de superplastificantes de última geração à base de copolímero vinílico e copolímero de poliácrlato em relação à massa de ligante em misturas geopoliméricas à base de escória e de cinza volante ativadas com hidróxido de sódio e seu silicato. Os autores observaram redução de 70-85% da resistência à flexão e à compressão das misturas com escória aos 2 dias de idade com o uso do aditivo à base de copolímero vinílico. Aos 28 dias, a redução foi de 27-40% com o uso do mesmo aditivo. Enquanto o aditivo à base de copolímero de poliácrlato não exerceu influência sobre a resistência mecânica tanto das misturas com escória quanto das misturas com cinza volante em ambas as idades testadas. Quanto ao desempenho dos aditivos na fluidez das misturas, não foram



observadas melhoras em relação às misturas de referência sejam elas com escória ou cinza volante.

Hardjito et al. (2004) estudaram os efeitos do uso de aditivo à base de naftaleno sulfonado em concretos geopoliméricos à base de cinza volante ativada com hidróxido de sódio e silicato de sódio e observaram uma melhora na trabalhabilidade do material com os teores de 1; 1,5; 2; 2,5; 3 e 3,5% em relação à massa de cinza volante. Utilizando até 2% de aditivo, não houve influência significativa na resistência à compressão aos 7 dias. Porém, uma redução foi observada com teores maiores do que 2%, chegando a 46 MPa de resistência à compressão aos 7 dias com 3,5% de aditivo contra 56,8 MPa da mistura de referência e 56,5 MPa da mistura contendo 2% de aditivo.

Palacios, Banfill e Puertas (2008)<sup>4</sup> (apud CRIADO et al., 2009) observaram que a presença de aditivos à base de naftaleno sulfonado reduziu drasticamente a tensão de cisalhamento quando adicionados a pastas e argamassas de escória ativadas com hidróxido de sódio.

Criado et al. (2009) verificaram a influência de 0,8% de aditivos à base de lignossulfonato, melamina sulfonado e policarboxilato em pastas de geopolímero à base de cinza volante ativadas com hidróxido de sódio e silicato de sódio. O lignossulfonato causou segregação nas misturas onde foi utilizado, impossibilitando a avaliação das suas propriedades. O aditivo à base de melamina diminuiu a viscosidade plástica e a tensão de escoamento das pastas, mas não foi observado efeito na fluidez. Isso pode ter ocorrido devido a uma possível instabilidade do aditivo em meio altamente alcalino. Já o policarboxilato, mesmo podendo ser também instável em ambientes de pH baixo, atuou fluidificando a pasta, provavelmente devido ao efeito de repulsão estérica.

Assim como Palacios, Banfill e Puertas (2008), Sathonsaowaphak, Chindaprasirt e Pimraksa (2009) registraram redução na resistência mecânica com o uso de aditivo à base de naftaleno sulfonado, porém em argamassas de geopolímeros à base de cinza de lignito hidróxido de sódio e silicato de sódio. Foram testados teores de 1, 3, 6 e 9% de aditivo em relação à massa de cinza de lignito. Os teores de 1 e 3% melhoraram a trabalhabilidade em torno de 16-17% em relação à mistura sem aditivo, mantendo a resistência à compressão em 54-57 MPa. Enquanto os teores de 6 e 9% reduziram a resistência à

---

<sup>4</sup> PALACIOS, M., BANFILL, P.F.G., PUERTAS, F. Rheology and setting of alkali-activated slag pastes and mortars: effect of organic admixture. **ACI Materials Journal**, v. 105, i. 2, p. 140–148, 2008.

compressão, que chegou a 40 MPa com 9% de aditivo. Também foi investigada a adição de uma quantidade adicional de água, cujo desempenho foi melhor que o do aditivo tanto na trabalhabilidade quanto na resistência à compressão. Com base nisso, os autores consideraram o naftaleno sulfonado como não efetivo para as misturas em questão, e sugeriram que a melhora na trabalhabilidade alcançada possa ser efeito da adição de água presente no aditivo, e não no efeito fluidificante do aditivo em si.

Wang et al. (2009)<sup>5</sup> (apud NEMATOLLAHI; SANJAYAN, 2014b) estudaram os efeitos de aditivos à base de naftaleno sulfonado e melamina sulfonado em pastas e argamassas de geopolímero misto de escória e metacaulim ativados com hidróxido de sódio e silicato de sódio. Observou-se que ambos os aditivos melhoraram a trabalhabilidade das misturas e aumentaram a resistência à compressão inicial das misturas, porém reduziram a resistência numa idade mais tardia. Os mesmos autores ainda conseguiram identificar o ponto ótimo e o ponto de saturação dos aditivos como sendo 0,6% e 2% para o naftaleno sulfonado e 1,6% e 2,3% em relação à massa de escória e metacaulim para o melamina sulfonado, respectivamente.

Kong e Sanjayan (2010) estudaram o efeito de aditivos à base de naftaleno sulfonado e policarboxilato em concretos geopoliméricos de cinza volante ativados com hidróxido de potássio e silicato de sódio nos teores de 1,19 e 3,3%, respectivamente, em relação à massa de cinza. Os autores chegaram à conclusão de que o uso destes dois tipos de aditivo não traz benefícios às misturas testadas. Não houve melhora significativa na trabalhabilidade e a resistência à compressão foi prejudicada com a incorporação de ambos os aditivos. O policarboxilato reduziu em 54% a resistência à compressão, enquanto o naftaleno sulfonado reduziu 21,8% da resistência.

Rattanasak, Pankhet e Chindaprasirt (2011) obtiveram valores de resistência à compressão maiores do que os da mistura de referência quando utilizados como aditivos em argamassas geopoliméricas à base de cinza volante, hidróxido de sódio e silicato de sódio cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) e sacarose em teores de 1 e 2% em relação à massa de cinza volante. O aumento na resistência foi maior nas misturas contendo 1% dos aditivos testados,

---

<sup>5</sup> WANG, Q.; LI, L.; WU, C.P.; SUI, Z.T. Research on adaptability of slag-based geopolymer with superplasticizer. **Key Engineering Materials**, v. 405, p. 129-134, 2009.

sendo o maior ganho registrado com o uso de sulfato de sódio, cuja resistência foi de 25,8 MPa sem aditivo para 32,2 MPa.

Laskar e Bhattacharjee (2012) investigaram os efeitos de aditivos dispersantes à base de lignossulfonato e policarboxilato em misturas de geopolímero à base de cinza volante e hidróxido de sódio e silicato de sódio como ativadores alcalinos. Os teores utilizados foram 1 e 1,5% de ambos os aditivos em relação à massa de cinza volante. Os autores obtiveram um aumento significativo no espalhamento com ambos os aditivos, principalmente com o lignossulfonato que chegou a aumentar o espalhamento em 40% em relação à referência com 1,5% de aditivo. Porém, neste caso, foi observada a presença de segregação na mistura onde duas fases foram formadas, uma fase densa inferior e uma fase cremosa superior, indicando uma possível sobra de aditivo.

Nematollahi e Sanjayan (2013)<sup>6</sup> (apud NEMATOLLAHI; SANJAYAN, 2014b) investigaram os efeitos de aditivos à base de policarboxilatos, naftaleno sulfonado e melamina sulfonado. No caso de geopolímeros de cinza volante ativados com hidróxido de sódio e silicato de sódio, os policarboxilatos de última geração foram os mais efetivos, aumentando o espalhamento em 39-45%.

Muitos autores, inclusive alguns citados acima, citam a falta de estabilidade dos aditivos no meio altamente alcalino fornecido pelos ativadores químicos dos geopolímeros. Palacios e Puertas (2005) estudaram a estabilidade de 5 aditivos em meio alcalino através da análise por espectrometria de infravermelho para tentar explicar seu funcionamento em misturas geopoliméricas. Os aditivos testados foram dois à base de policarboxilatos, um à base de melamina sulfonado, um à base de naftaleno sulfonado e um à base de copolímero vinílico. Todos os aditivos foram imersos em três meios alcalinos: solução de hidróxido de cálcio (pH 12,4), de hidróxido de sódio (pH 13,6) e de silicato de sódio (pH 13,4).

Quando dissolvidos em hidróxido de cálcio, a formulação de todos os aditivos se manteve a mesma estruturalmente. Isso justifica seu bom desempenho quando o aglomerante é o cimento Portland, cujo meio é rico em íons de cálcio. Já em meio altamente alcalino (pH 13,0 –

---

<sup>6</sup> NEMATOLLAHI, B.; SANJAYAN, J. **Effect of superplasticizers on workability of fly ash based geopolymer**. Proceeding of the International Civil and Infrastructure Engineering Conference (InCIEC 2013). Kuching, Malaysia, p. 375-378, 2013.

13,6), esses aditivos sofreram mudanças na sua estrutura (PALACIOS; PUERTAS, 2005).

Nos aditivos à base de policarboxilatos, a hidrólise alcalina dos ésteres dá origem a sais carboxilatos e éteres. Como resultado, a cadeia principal é adsorvida na superfície das partículas da escória, enquanto as cadeias laterais se afastam da cadeia principal. Consequentemente, a repulsão estérica que estas cadeias laterais exercem é praticamente inexistente e as propriedades dos superplastificantes praticamente desaparecem. O que acontece com o copolímero vinílico é bastante similar. A amina contida no grupo sulfônico e o seu sal carboxilato são formados a partir da hidrólise alcalina da amida. Esta alteração explica a perda das suas propriedades fluidificantes. O aditivo à base de melamina sulfonado sofre pequenas alterações na sua formulação quando mantido em meios altamente alcalinos. Estas alterações são mais pronunciadas quando o ativador alcalino contém silicato de sódio, onde o aditivo fluidifica a mistura nos primeiros minutos, mas não a mantém ao longo do tempo. O aditivo à base de naftaleno sulfonado, pelo contrário, é bastante estável na solução de hidróxido de sódio, não apresentando alterações na sua estrutura. Esta é a razão pela qual o efeito deste aditivo é semelhante ao efeito quando utilizado cimento Portland. Porém, quando a solução alcalina contém silicato de sódio, este composto sofre alterações nos grupos sulfônicos. Esta pode ser a razão pela qual nenhum desses dos três tipos de aditivos (naftaleno sulfonado, copolímero vinílico e melamina sulfonado) é eficiente quando o ativador alcalino utilizado contém silicato de sódio (PALACIOS; PUERTAS, 2005).

Em resumo, dentre todas as misturas testadas por Palacios e Puertas (2005), o único aditivo cuja estrutura não foi afetada em solução de hidróxido de sódio foi o naftaleno sulfonado. Nesta condição, os valores de resistência são maiores, a trabalhabilidade é melhor e os tempos de início e fim de pega são atrasados quando comparados à mistura de referência. Somente neste caso, dentre todos os testados, o desempenho do aditivo é semelhante ao desempenho obtido em misturas cimentícias.

Nematollahi e Sanjayan (2014a) também testaram seis tipos de aditivos (um à base de melamina sulfonado, dois à base de naftaleno sulfonado e três à base de policarboxilato) em misturas geopoliméricas de cinza volante com ativador alcalino variando entre hidróxido de sódio e o mesmo combinado ao seu silicato. Estes autores, com base nas afirmações de Palacios e Puertas (2005) apresentadas acima quanto à estabilidade dos aditivos, utilizaram na mistura contendo apenas

hidróxido de sódio como ativador, o aditivo à base de naftaleno. Esta mistura teve um acréscimo no espalhamento de 136% quando comparada à mistura de referência sem redução da resistência à compressão. Estes resultados se assemelham aos obtidos por Palacios e Puertas (2005) com escória ativada por hidróxido de sódio. Nas misturas com a combinação de hidróxido e silicato de sódio houve um aumento no espalhamento que variou de 3 a 45%, mas também houve uma redução na resistência à compressão em relação à referência que variou de 15 a 51% dependendo do aditivo utilizado. A maior redução foi observada na mistura contendo naftaleno sulfonado e a menor, policarboxilato. Os autores atribuíram isso a um pequeno efeito de repulsão estérica causado pelas cadeias laterais dos policarboxilatos que ainda persiste mesmo após a reestruturação dos seus compostos após a hidrólise alcalina.

Em resumo, a partir dos resultados de Nematollahi e Sanjayan (2014a), pode se dizer que, no caso das misturas estudadas por estes autores, o melhor tipo de superplastificante para geopolímeros de cinza volante ativados com hidróxido de sódio seria o de base naftaleno sulfonado, que melhora o espalhamento e a resistência do material. E no caso do ativador combinado, a melhor escolha seria o policarboxilato, porém seria necessário verificar se a melhora no espalhamento compensaria a redução na resistência à compressão.

Como foi possível observar acima, os resultados obtidos com diversos tipos de aditivos em diversos tipos de geopolímero variam bastante. Isso é devido às diversidades nas condições de preparo das misturas, composição dos minerais aluminossilicatos, natureza e concentração dos ativadores alcalinos, tipo e teor do aditivo, duração e temperatura de cura. Portanto é necessário que sejam feitas mais investigações nesta área, uma vez que os resultados não são conclusivos.

## 2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na presente revisão bibliográfica, foi possível identificar a possibilidade em se utilizar dos geopolímeros como alternativa ao uso do cimento Portland. As propriedades aglomerantes e mecânicas são desenvolvidas a partir da ativação alcalina de materiais ricos em óxidos de silício e alumínio que podem ser naturais ou residuais de processos industriais. A geopolimerização acontece em meio alcalino que pode ser obtido através da dissolução de um material alcalino em água destilada.

Porém, assim como acontece com misturas à base de cimento Portland, os geopolímeros têm se mostrado materiais de baixa trabalhabilidade, o que dificulta sua moldagem e aplicação. Com o objetivo de sanar este problema e incentivar o uso deste material, sugere-se a introdução de aditivos dispersantes na mistura em vez do acréscimo de uma quantidade extra de água, que pode prejudicar o desempenho mecânico do material. Porém, os aditivos disponíveis no mercado são produtos químicos confeccionados para funcionar em sistemas à base de cimento Portland, que não é o caso dos geopolímeros. Então torna-se importante conhecer o comportamento destes aditivos em misturas geopoliméricas e sua influência nas propriedades do material tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido.

Neste trabalho optou-se pelo uso de cinza volante como fonte de aluminossilicatos devido às vantagens citadas anteriormente. Como ativador químico, optou-se pelo hidróxido de sódio por seu baixo custo e fácil obtenção, além do consentimento por parte dos pesquisadores sobre seu efeito positivo na geopolimerização. Portanto, somente as propriedades de ambos os materiais serão apresentadas na sequência.

Quanto aos aditivos dispersantes, optou-se por duas bases químicas diferentes: policarboxilato de sódio e lignossulfonato de sódio. A escolha pelo aditivo à base de lignossulfonato foi feita pois estes são os mais utilizados na construção civil, além de serem os mais facilmente encontrados no mercado e também os mais baratos. O aditivo à base de policarboxilato foi escolhido com base nos demais trabalhos publicados envolvendo o uso de aditivos dispersantes em geopolímeros, cuja maioria engloba aditivos deste tipo. Além disso, a escolha por estas duas bases químicas foi baseada nos diferentes modos de ação de ambos os tipos no cimento Portland. Como citado anteriormente, o lignossulfonato age pela repulsão eletrostática e o policarboxilato, através de uma combinação da repulsão eletrostática com a repulsão estérica, sendo que o efeito eletrostático é dominante.

Com base nestas informações, delineou-se o programa experimental executado nesta Dissertação de Mestrado.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos que foram empregados no desenvolvimento do programa experimental buscando-se atingir os objetivos propostos.

Os objetivos deste trabalho foram definidos, assim como o programa experimental, motivados pelo interesse em dar continuidade aos estudos a respeito de geopolímeros no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Neste trabalho foram adotados os mesmos parâmetros de dosagem e as mesmas matérias primas descritas e utilizadas no trabalho de Livi (2013), com o uso de aditivos dispersantes em geopolímeros, fazendo uma avaliação do estado fresco e endurecido das misturas.

As misturas de geopolímero em questão têm sua composição baseada em cinza volante como fonte de aluminossilicatos e o hidróxido de sódio como ativador químico, além de água e aditivo dispersante.

Foram confeccionadas misturas de geopolímero variando-se a concentração molar da solução ativadora (M), a relação mássica entre a solução ativadora e a cinza volante (S) e o tipo e o teor de aditivo dispersante empregado. Os fatores citados foram variados da seguinte forma:

- relação molar entre o hidróxido de sódio e a água (M): 8M e 12M;
- relação mássica entre a solução ativadora e a cinza volante (S): 0,50; 0,55; 0,60;
- aditivo dispersante: policarboxilato (PC) e lignossulfonato de sódio (LS);
- teor de aditivo dispersante: 0,2%; 0,8%; 1,2% em relação à massa de cinza volante.

A cura do material foi feita em estufa a 65° C durante 22 horas.

Optou-se por estes parâmetros de cura com base nos resultados de Livi (2013), onde verificou-se que, para as concentrações molares de 8M e 12M, foram obtidos resultados de resistência mecânica muito semelhantes para as temperaturas de cura de 65° C e 85° C. Com base nisso e ainda com o intuito de economizar energia, optou-se pela cura térmica a 65° C.

De acordo com Hardjito e Rangan (2005), a temperatura da cura e sua duração exercem papéis importantíssimos no desenvolvimento das propriedades dos geopolímeros. Palomo, Grutzek e Blanco (1999) afirmam que o aumento da temperatura de cura resulta em maior

resistência à compressão. No entanto, Hardjito e Rangan (2005) e Diaz-Loya, Allouche e Vaidya (2011) afirmam ser possível que a cura seja feita a menos de 40° C ou ainda em temperatura ambiente, porém isso só é possível devido à presença de silicato de sódio na composição das misturas, possibilitando a ocorrência da geopolimerização a baixas temperaturas.

O espalhamento das misturas foi determinado através do ensaio de miniabatimento do tronco-cone ou mini-slump que avalia a fluidez da mistura no estado fresco. E a avaliação do material quanto às suas propriedades mecânicas foi feita através de determinações de resistência à flexão (Rf) e à compressão (Rc) com 1 e 28 dias de idade.

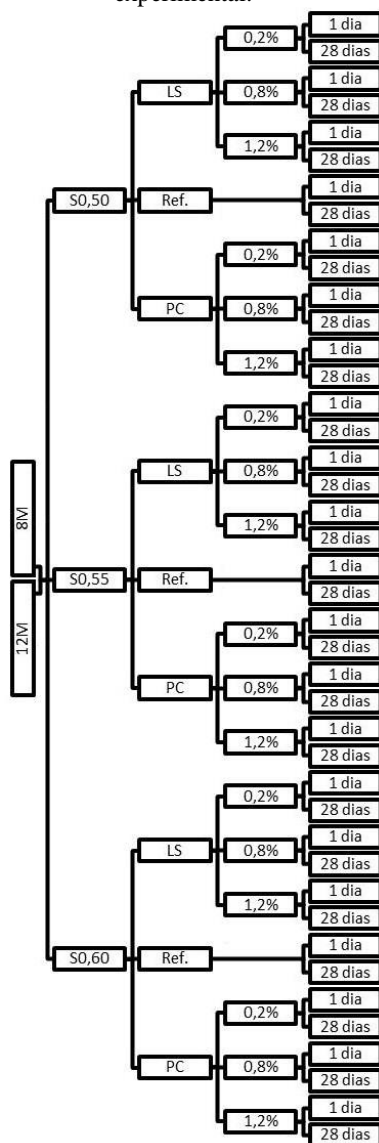
O esquema apresentado na Figura 5 compreende todas as misturas confeccionadas neste programa experimental.

Na primeira coluna do esquema estão dispostas as concentrações molares da solução ativadora (8M e 12M) e na segunda coluna, as relações mássicas entre solução ativadora/cinza volante (S0,50; S0,55 e S0,60). A terceira coluna mostra a presença ou não de aditivo dispersante e seu tipo (LS – lignossulfonato de sódio, PC – policarboxilato de sódio e REF. – mistura de referência sem aditivo). Na quarta coluna estão os teores de aditivo em relação à massa de cinza volante (0,2; 0,8 e 1,2%) e na última coluna estão as idades de rompimento à flexão e à compressão dos corpos de prova moldados.

No total foram confeccionadas 84 misturas diferentes em duplicata (uma para cada idade de rompimento). Isso levou a uma soma de 168 misturas, a partir das quais foram moldados 504 corpos de prova prismáticos que foram rompidos com 1 ou 28 dias de idade.



Figura 5 Esquema contendo todas as misturas confeccionadas no programa experimental.



### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 Cinza volante

A cinza volante utilizada foi proveniente da Central Termoeletrica Jorge Lacerda e foi fornecida pela empresa Tractebel Energia.

Optou-se por moer a cinza volante porque, originalmente, o tamanho das partículas era maior do que das cinzas utilizadas em outros trabalhos da literatura.

Uma comparação entre as cinzas utilizadas em outras pesquisas e a cinza fornecida pela Tractebel Energia é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 Comparação entre as características físicas da cinza volante utilizada em outras pesquisas.

IDENTIFICAÇÃO	MASSA ESPECÍFICA (g/cm <sup>3</sup> )	DIÂMETRO (μm)
Jorge Lacerda	2,36	90% < 209,20 50% < 80,95
Hardjito e Rangan (2005)	1,58	80% < 46,67
Fernández-Jiménez e Palomo (2005)	-	90% < 45,00 50% < 10,00
Panias, Giannopoulou e Perraki (2007)	-	50% < 75,00
Criado et al. (2007)	-	92% < 45,00 90% < 81,26
Diaz-Loya, Allouche e Vaidya (2011)	-	80% < 78,56 50% < 64,96

Fonte: Adaptado de Livi (2013)

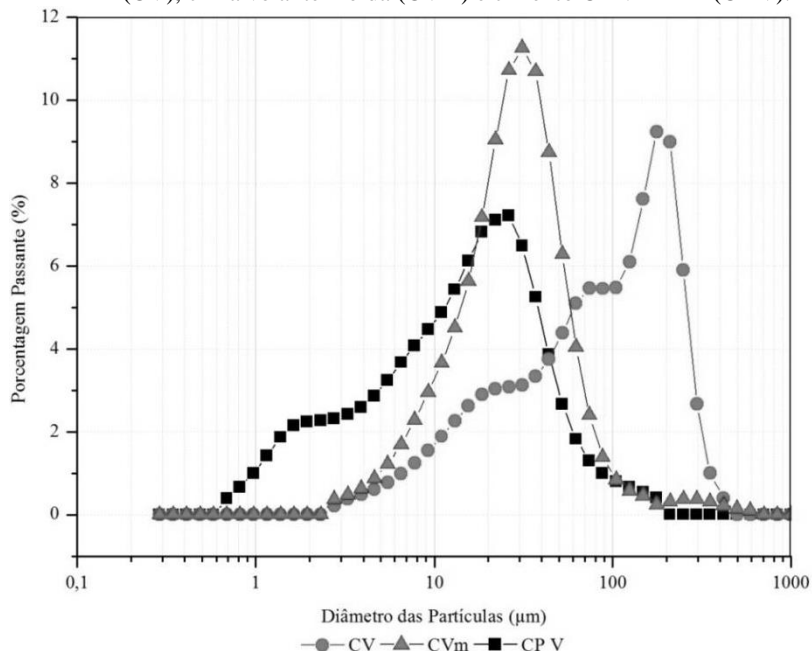
Então, assim como no trabalho de Livi (2013), procedeu-se a moagem da cinza em moinho de bolas AMEF, modelo AMBI 480 X 400 contendo 120 bolas de aço de 29,7 mm de diâmetro e 1310 g de massa unitária, em conjunto com 150 bolas de 19,2 mm e 360 g. A moagem foi feita em lotes de 6 kg de cinza volante. Cada lote de cinza foi moído em cinco ciclos de aproximadamente 110 minutos cada.

A distribuição de tamanho de partículas da cinza volante moída (CVm) apresenta maior teor de partículas finas em comparação à cinza volante não moída (CV), aproximando-se da distribuição de tamanho de partículas do cimento Portland CP-V ARI (CP V). Tal comparação pode ser visualizada na Figura 6.

Além da distribuição do tamanho de partículas semelhante à do cimento Portland, obteve-se também uma redução no diâmetro médio das partículas ( $D_{50}$ ) que passou de 80,95  $\mu\text{m}$  para 25,66  $\mu\text{m}$ . Desta forma, a cinza volante se aproximou da utilizada no trabalho de Fernández-Jiménez e Palomo (2005), estando ainda mais fina do que a utilizada nos trabalhos de Panias, Giannopoulou e Perraki (2007) e Díaz-Loya, Allouche e Vaidya (2011).

A massa específica da cinza volante, equivalente a 2,36  $\text{g}/\text{cm}^3$ , foi determinada através do método de picnometria, conforme prescrito na ABNT NBR 6508:1984.

Figura 6 Distribuição das porcentagens retidas: cinza volante não moída (CV), cinza volante moída (CVm) e cimento CP V – ARI (CP V).



Na Tabela 3 são apresentados os resultados da determinação da composição química da cinza volante, expressos em porcentagem dos óxidos constituintes. Estes valores foram obtidos por Livi (2013) através da espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) com um analisador Philips Analytical PW 2400.

Tabela 3 Composição química de cinza volante.

ELEMENTO	CINZA VOLANTE (%)
SiO <sub>2</sub>	64,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,2
K <sub>2</sub> O	2,0
CO <sub>2</sub> *	1,5
CaO	1,4
TiO <sub>2</sub>	1,4
MgO	0,6
Na <sub>2</sub> O	0,2
SO <sub>3</sub>	0,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1
BaO	0,1
ZrO <sub>2</sub>	0,1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1

\* O teor de CO<sub>2</sub> representa o valor da perda ao fogo (L.O.I.) à temperatura de 1000° C.

Fonte: Livi (2013).

É possível avaliar a reatividade do material através da soma dos óxidos reativos (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Neste caso, a soma dos teores dos óxidos reativos foi de 89,2%, o que caracteriza o material como sendo de bom poder reativo, segundo Fernández-Jiménez e Palomo (2003). Com base nesses resultados ainda pôde-se observar que os teores de CO<sub>2</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> estão dentro dos intervalos sugeridos por Fernández-Jiménez e Palomo (2003) como ideais para a ativação alcalina da cinza volante (CO<sub>2</sub> < 5%; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> < 10%). Somente o teor de óxido de silício estando acima do indicado pelos autores (40 < SiO<sub>2</sub> < 50%). Os resultados de espectrometria de fluorescência de raios X também mostraram um baixo teor de CaO (1,40%), o que é desejável, já que, segundo Hardjito e Rangan (2005), o excesso de cálcio interfere de forma negativa na polimerização. E, por último, foi possível classificar a cinza volante em questão através do cálculo da relação Si:Al. A cinza possui relação Si:Al igual a 2,80, ficando entre duas classes: polissialatossiloxo (Si:Al igual a 2) e polissialatodissiloxo (Si:Al igual a 3). Segundo Davidovits (1999), as principais aplicações para os geopolímeros da classe polissialatossiloxos são cimentos com baixo teor de CO<sub>2</sub>, encapsulamento de resíduos tóxicos e radioativos. Quanto aos polissialatodissiloxos, seu uso pode ser como compósitos com alta

resistência ao calor, equipamentos de fundição, materiais compósitos à base de fibra de vidro, etc.

### 3.1.2 Hidróxido de sódio

O reagente responsável pela ativação química do geopolímero escolhido foi o hidróxido de sódio em escamas, comercialmente conhecido por soda cáustica, da empresa Unipar Carbocloro.

As características físico-químicas informadas pelo fornecedor são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 Características físico-químicas do hidróxido de sódio em escamas.

CARATERÍSTICA	RESULTADO
Alcalinidade total	97,5%
Carbonatos ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )	< 0,60%
Cloretos ( $\text{NaCl}$ )	< 0,03%
Ferro (Fe)	< 6,0 ppm
Massa específica	2,13 g/cm <sup>3</sup>

O hidróxido de sódio foi utilizado como ativador químico na forma de solução em água destilada. Esta solução é chamada de solução ativadora e a primeira etapa do seu preparo foi feita em béquer. Na segunda etapa, o conteúdo do béquer foi transferido para um balão volumétrico, onde foi feito o ajuste do volume e homogeneização da solução. Porém, sabe-se que a reação do hidróxido de sódio em contato com a água, chamada dissociação iônica, é uma reação altamente exotérmica e, portanto, libera uma grande quantidade de energia em forma de calor. Então, é importante aguardar até que a temperatura da solução esteja baixa o suficiente para permitir seu manuseio em segurança antes de transferi-la para o balão.

Foram preparadas soluções nas concentrações de 8M e 12M.

A quantidade de soluto para cada concentração de solução foi determinada a partir da Equação 4, onde  $[\text{NaOH}]$  é a concentração molar da solução de hidróxido de sódio (M ou mol/L),  $m$  é a massa de soluto (g),  $M$  a massa molecular do soluto (40 g/mol) e  $V$  o volume do balão volumétrico (500 mL).

$$[\text{NaOH}] = \frac{m}{M \times V} \quad \text{Equação 4}$$

Então foram pesadas as soluções e determinadas a massa específica ( $d_{SA}$ , g/cm<sup>3</sup>) e o teor de sólidos, ou seja, a massa do soluto em relação à solução ( $\tau$ ) para cada uma das molaridades. Essa relação, expressa em valor absoluto, é determinada conforme a Equação 5.

$$\tau = \frac{[NaOH] \cdot M}{d_{SA}} \quad \text{Equação 5}$$

### 3.1.3 Aditivos dispersantes

Para atender aos objetivos deste trabalho, foram utilizados dois tipos de aditivo dispersante de base química diferente: um aditivo à base de policarboxilato de sódio (PC) e outro à base de lignossulfonato de sódio (LS).

Os aditivos utilizados foram o ADVA™ CAST 585 (PC) e o MIRA™ RT 118 (LS) da marca GRACE Construction Products e foram gentilmente fornecidos pelo fabricante.

As principais características de cada um dos dois aditivos dispersantes obtidas junto ao fornecedor estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 Principais características dos aditivos dispersantes.

CARACTERÍSTICA	ADVA™ CAST 585 (PC)	MIRA™ RT 118 (LS)
Classificação (ABNT NBR 11768:2011)	Superplastificante SPII	Redutor de água/Plastificante PR
Aspecto	Líquido	Líquido
Cor	Amarelo claro a âmbar	Marrom escuro
Validade	12 meses	6 meses
Massa específica	1,060 g/cm <sup>3</sup>	1,185 g/cm <sup>3</sup>

Optou-se por variar o teor dos aditivos de 0,2 a 1,2% da massa de cinza volante de modo a não ultrapassar o limite máximo sugerido por Davidovits (1,5%), a partir do qual as partículas de aditivo podem interferir no contato entre as nanopartículas do geopolímero, afetando a ocorrência da reação. Hardjito et al. (2004) observaram uma redução de 1/3 da resistência à compressão com o uso de 3,5% de aditivo à base de naftaleno sulfonado em relação à massa de cinza volante.

Dentro deste intervalo, os teores escolhidos foram 0,2; 0,8 e 1,2% em relação à massa de cinza volante para ambos os aditivos.

### 3.2 PROPORCIONAMENTO DAS MISTURAS

A relação mássica entre solução ativadora/cinza volante (S) é apresentada na Equação 6. A partir do cálculo da massa de cinza volante e de solução ativadora para cada um dos valores de S (0,50; 0,55 e 0,60), determinou-se o volume de pasta ( $V_{pasta}$ ,  $\text{cm}^3$ ) que pode ser produzido com as soluções preparadas anteriormente ( $m_{SA}$ ). Esse cálculo é descrito na Equação 7.

$$S = \frac{m_{SA}}{m_{CV}} \quad \text{Equação 6}$$

$$V_{pasta} = \frac{m_{CV}}{d_{CV}} + \frac{m_{SA}}{d_{SA}} \quad \text{Equação 7}$$

Onde  $m_{SA}$  é a massa da solução ativadora (g),  $m_{CV}$  a massa de cinza volante (g),  $d_{SA}$  a massa específica da solução ativadora ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) e  $d_{CV}$  a massa específica da cinza volante ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

Determinou-se que o volume de material a ser confeccionado seria de  $998,40 \text{ cm}^3$ , referente a um conjunto de três prismas com dimensões de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$  e uma produção extra de material de 30%.

Assim, a massa de solução ativadora corrigida ( $m'_{SA}$ , g) para produzir os  $998,40 \text{ cm}^3$  necessários foi obtida através da Equação 8, e a massa de cinza volante ( $m'_{CV}$ , g), através da Equação 9.

$$m'_{SA} = \frac{998,40 \cdot m_{SA}}{V} \quad \text{Equação 8}$$

$$m'_{CV} = \frac{m_{SA}}{S} \quad \text{Equação 9}$$

Calculou-se a massa de hidróxido de sódio ( $m_{HS}$ , g) através da Equação 10 e a massa de água ( $m_{AG}$ , g) através da Equação 11.

$$m_{HS} = m_{SA} \cdot \tau \quad \text{Equação 10}$$

$$m_{AG} = m_{SA} - m_{HS} \quad \text{Equação 11}$$

Na Tabela 6 apresenta-se a composição das misturas e relações de massa entre seus constituintes, determinados com base na metodologia de cálculo detalhada anteriormente.

Tabela 6 Composição das misturas e relações de massa entre seus constituintes.

MISTURA	$m'_{CV}$ (g)	$m'_{SA}$ (g)	$m_{HS}$ (g)	$m_{AG}$ (g)	CV/ HS	CV/ AG	HS/ AG
8M S0,50	1202,55	601,28	156,43	444,85	7,69	2,70	0,35
8M S0,55	1146,42	630,53	164,04	466,49	6,99	2,46	0,35
8M S0,60	1095,30	657,18	170,97	486,20	6,41	2,25	0,35
12M S0,50	1202,55	601,28	234,64	366,63	5,13	3,28	0,64
12M S0,55	1192,46	655,85	236,70	419,15	5,04	2,84	0,56
12M S0,60	1095,30	657,18	256,46	400,72	4,27	2,73	0,64

A massa de aditivo utilizado em cada mistura é relativa à massa de cinza volante presente na mesma. Neste programa experimental, optou-se por trabalhar com três teores de cada aditivo, 0,2%, 0,8% e 1,2%, a fim de obter uma tendência de comportamento.

### 3.3 PREPARO DAS MISTURAS

#### 3.3.1 Amassamento

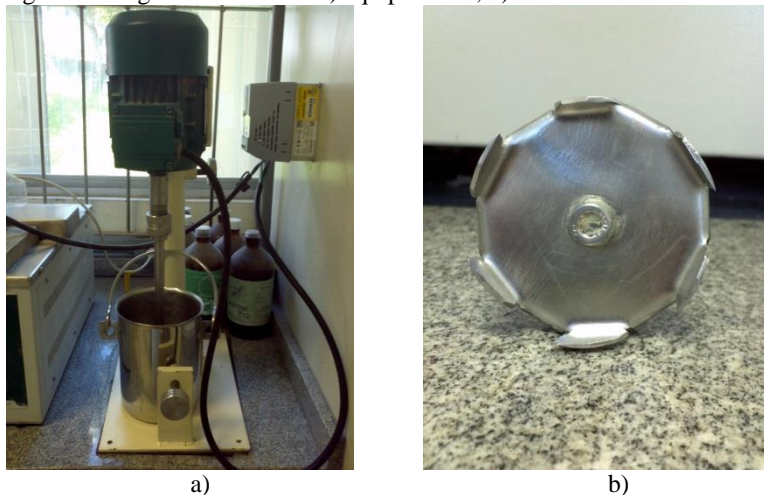
O aditivo, a cinza volante e a solução ativadora previamente preparada, conforme descrito no item 3.1.2, eram pesados em balança devidamente calibrada e mantidos em sala com temperatura e umidade do ar controladas até o momento do preparo da mistura.

A mistura dos materiais foi feita em um agitador mecânico (Figura 7a) com haste do tipo *cawles* (Figura 7b) da marca TEDEMIX, modelo ML-03, potência de 0,75 HP a uma frequência de 25 Hz.

O processo consistiu em transferir a massa de solução ativadora para o recipiente onde a pasta de geopolímero seria confeccionada e, então, adicionar a cinza volante ao recipiente aos poucos, à medida que iniciava o processo de mistura com o agitador mecânico. Após 2 minutos de mistura, o agitador era desligado por 1 minuto para que os acúmulos de material nas paredes do recipiente pudessem ser desprendidos com a ajuda de uma espátula e para que o aditivo fosse adicionado à mistura. Passado 1 minuto, a agitação recomeçava e continuava por mais 2 minutos, até que o ciclo completasse 5 minutos de duração ao todo.



Figura 7 Agitador mecânico a) equipamento; b) haste *cawles*.



### 3.3.2 Moldagem dos corpos de prova

Anteriormente à confecção das misturas e à moldagem dos corpos de prova, era feita uma preparação dos moldes, protegendo sua superfície com uma camada de filme plástico de PVC (Figura 8a). Esse processo foi muito importante, pois facilitou a desmoldagem dos prismas, além de minimizar a ocorrência de possíveis traumas gerados durante a desmoldagem, para que isto não interferisse na integridade dos mesmos e nos resultados dos ensaios.

Feita a preparação com o filme plástico de PVC, a mistura era entornada no molde, formando um conjunto de 3 corpos de prova prismáticos de 4 x 4 x 16 cm.

Após preencher o molde com a pasta, uma placa de vidro envolta em plástico era colocada sobre toda a superfície dos corpos de prova a fim de minimizar a ocorrência de evaporação da água da mistura durante a cura térmica (Figura 8b).

Figura 8 Moldes prismáticos a) envelopados em filme PVC; b) protegidos com vidro e plástico.



### 3.3.3 Cura térmica

A cura térmica dos corpos de prova foi feita em estufa microprocessada com circulação forçada de ar (Figura 9) por um período de 22 horas a 65° C. Terminado o período de cura, as portas da estufa eram abertas e mantidas dessa forma ainda com os moldes no seu interior a fim de evitar falhas nos corpos de prova geradas por mudanças bruscas de temperatura. Uma hora após o término do período de cura térmica, os moldes contendo os corpos de prova eram retirados da estufa e os corpos de prova eram desmoldados.

Figura 9 Estufa microprocessada com ventilação a) parte externa; b) parte interna com os moldes.



Na sequência a massa e as dimensões das arestas de cada corpo de prova e sua massa específica eram determinadas para fins de

caracterização dos corpos de prova. Estes dados estão dispostos nas Tabelas 7 a 9 no APÊNDICE I.

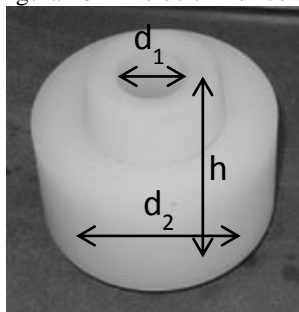
### 3.4 DETERMINAÇÃO DO ESPALHAMENTO E MANUTENÇÃO DO ESPALHAMENTO

A determinação do espalhamento das misturas de geopolímero foi feita através do ensaio do miniabatimento do tronco-cone.

O método do miniabatimento é uma adaptação do método descrito por Kantro<sup>7</sup> (1980) (apud MONTE, 2008) e é muito semelhante ao ensaio de abatimento do tronco-cone feito com misturas de concreto de cimento Portland, mantendo, inclusive, as proporções entre as medidas do tronco-cone. Para realização do ensaio, utilizou-se um molde cilíndrico de interior cônico invertido cujas dimensões são: diâmetros de 2,5 mm ( $d_1$ ) e 41,7 mm ( $d_2$ ) e altura ( $h$ ) de 60,7 mm, como mostrado na Figura 10.

O ensaio consistiu em preencher o tronco-cônico posicionado sobre uma placa de vidro com a pasta e, em seguida, remover o molde, deixando o material se espalhar pela placa. Após a estabilização do espalhamento da pasta, foram medidos dois diâmetros perpendiculares com a ajuda de um paquímetro. E, então, determinou-se o espalhamento da pasta ensaiada calculando-se o valor médio entre os dois diâmetros medidos.

Figura 10 Molde cilíndrico de interior cônico.



<sup>7</sup> KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test. **Cement and concrete aggregates**, v.2, n. 2, p. 95-108, 1980.

As principais vantagens deste método são a pequena quantidade de material necessária para o ensaio e a possibilidade de observar a ocorrência de fenômenos como a exsudação e a segregação da mistura.

Para determinar a manutenção do espalhamento, esse mesmo ensaio foi repetido a cada 30 minutos durante 1 hora para cada uma das misturas. Vale ressaltar que, antes de cada repetição do ensaio, era feita uma homogeneização manual com espátula do material.

A avaliação da manutenção do espalhamento é interessante para verificar como o material se comporta com o passar do tempo, uma vez que, a aplicação do mesmo na prática não é imediata. Então, torna-se importante conhecer o comportamento das misturas ao longo de um período de tempo.

### 3.5 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

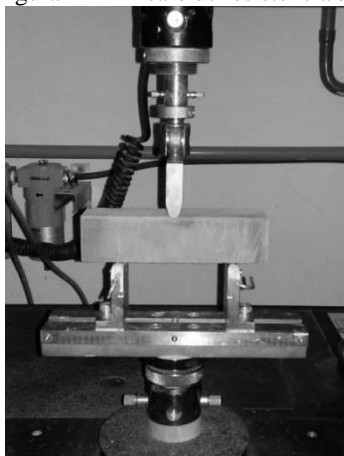
Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência à flexão e à compressão conforme prescrito na norma europeia BS EN 196-1:2005 – Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength.

#### 3.5.1 Determinação da resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão foi realizado em uma prensa computadorizada Instron 5569 a uma taxa de carregamento de  $50 \pm 10$  N/s em um sistema chamado de “dois apoios” ou “três pontos”, referente ao ponto de aplicação da carga e os dois apoios.

Os prismas foram posicionados no aparato de forma que seu eixo longitudinal estivesse ortogonal aos apoios e, então, a carga central foi aplicada até a ruptura dos corpos de prova, como mostrado na 0.

Figura 11 Ensaio de resistência à flexão.



A resistência à flexão foi calculada através da Equação 12.

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b \cdot h^2} \quad \text{Equação 12}$$

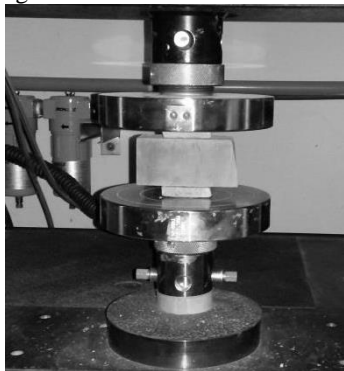
Onde  $R_f$  é o valor de resistência à flexão (MPa),  $F_f$  é a carga de ruptura na flexão (N);  $l$  é a distância entre os apoios (mm);  $b$  e  $h$  são a base e a altura da seção transversal (mm).

### 3.5.2 Determinação da resistência à compressão

A partir do ensaio de determinação da resistência à flexão dos prismas, foram obtidas duas metades de cada prisma. Cada uma dessas metades foi ensaiada à compressão em uma prensa computadorizada Instron 5569 a uma taxa de carregamento de  $2400 \pm 200$  N/s.

A norma europeia prevê o uso duas chapas de aço chamadas “placas auxiliares”. Estas chapas têm dimensões de 40 x 40 mm e espessura de 10 mm e garantem que a carga seja aplicada de forma uniforme e em uma área constante de 1600 mm<sup>2</sup>. As chapas foram posicionadas em cima e abaixo dos corpos de prova (Figura 12) e, então, o sistema composto pelas chapas e a metade do prisma foi centralizado em relação aos pratos da prensa, então a carga foi aplicada até a ruptura.

Figura 12 Ensaio de resistência à compressão.



A resistência à compressão foi calculada através da Equação 13.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad \text{Equação 13}$$

Onde  $R_c$  é a resistência à compressão (MPa),  $F_c$  é a carga de ruptura na compressão (N) e 1600 é a área de aplicação de carga (40 mm x 40 mm).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das determinações do espalhamento e sua manutenção foram agrupados por traço e são apresentados em forma de gráfico e discutidos na sequência.

Já os resultados de resistência à flexão e compressão com as idades de 1 e 28 dias foram agrupados de diversas maneiras, possibilitando a avaliação dos fatores: presença e teor de aditivo; molaridade da solução ativadora e relação mássica entre a solução ativadora e a cinza volante. Estes resultados serão apresentados em forma de gráfico e avaliados para cada uma das variáveis citadas.

Procurou-se estabelecer uma comparação de tendência com os resultados de espalhamento dos autores citados no item 2.2.3, mas principalmente com Palacios e Puertas (2005), Criado et al. (2009), Laskar e Bhattacharjee (2012), Nematollahi e Sanjayan (2014a). Já no caso da resistência à compressão a comparação pode ser feita com os resultados de Palacios e Puertas (2005), Nematollahi e Sanjayan (2014a) e ainda de Palomo et. al (2004) e Livi (2013), no caso das misturas de referência. E no caso da resistência à flexão, como não existem muitos trabalhos avaliando esta propriedade, uma comparação numérica pode ser feita com os resultados de Fernández-Jiménez e Palomo (2005) e Livi (2013) e até mesmo com o trabalho feito por Palacios e Puertas (2005), apesar de o mesmo apresentar um estudo em geopolímero à base de escória.

Porém é importante mencionar que esta comparação deve ser cautelosa, já que os trabalhos citados acima foram conduzidos em diferentes tipos de material (pasta, argamassa e concreto), com matérias primas de origem diferente e, principalmente, de composição química diferente.

Os resultados da determinação do espalhamento e sua manutenção não foram submetidos a tratamentos estatísticos, uma vez que não existe repetição, ou seja, o número de amostras para cada mistura é igual a 1.

Os resultados das determinações de resistência à flexão e compressão foram submetidos, com 95% de confiabilidade, a uma análise de variância (ANOVA) para verificação da existência ou não de diferenças significativas e à comparação múltipla de médias pelo teste de Bonferroni com o emprego do software GraphPad Prism 5.0. A fim de proporcionar discussões mais dinâmicas sobre os resultados, os resultados da análise estatística foram agrupados de forma resumida em tabelas que estão dispostas no APÊNDICE IV deste trabalho.

No que diz respeito às propriedades mecânicas do material, além dos resultados da resistência à flexão e compressão, foi estabelecida uma relação entre os valores de resistência à flexão e compressão a partir dos dados obtidos neste trabalho. Esta relação tem como finalidade prever, ainda que com cautela, o comportamento à flexão de materiais submetidos somente a ensaios de compressão; assim como acontece com o concreto de cimento Portland. Essa relação é apresentada no item 4.2.3.

#### 4.1 DETERMINAÇÃO DO ESPALHAMENTO E MANUTENÇÃO DO ESPALHAMENTO

Na sequência são apresentados os gráficos confeccionados com base nos resultados da determinação do espalhamento e manutenção ao longo do tempo (Figuras 13 a 18).

Optou-se por agrupar estes dados de acordo com o traço das misturas a fim de mostrar o comportamento das misturas ao longo dos 60 minutos de duração do ensaio.

Figura 13 Resultados da manutenção do espalhamento das misturas de traço 8MS0,50.

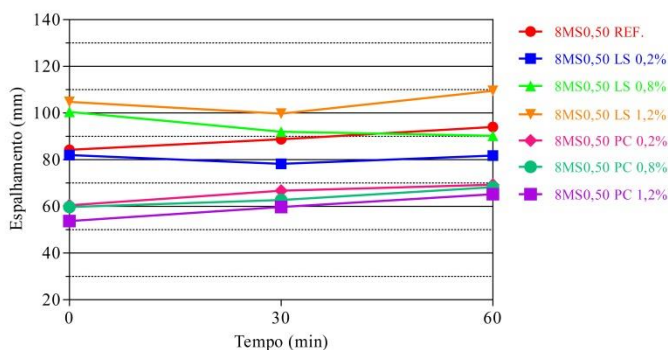




Figura 14 Resultados da manutenção do espalhamento das misturas de traço 8MS0,55.

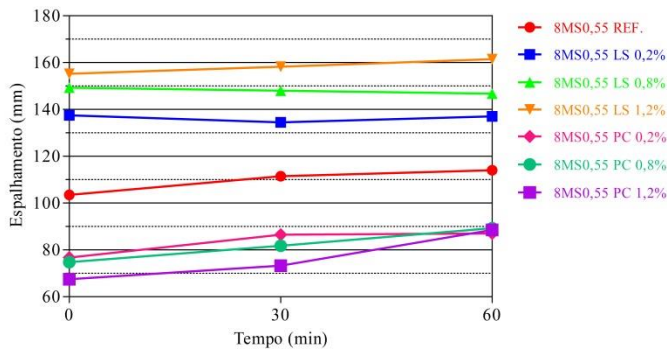


Figura 15 Resultados da manutenção do espalhamento das misturas de traço 8MS0,60.

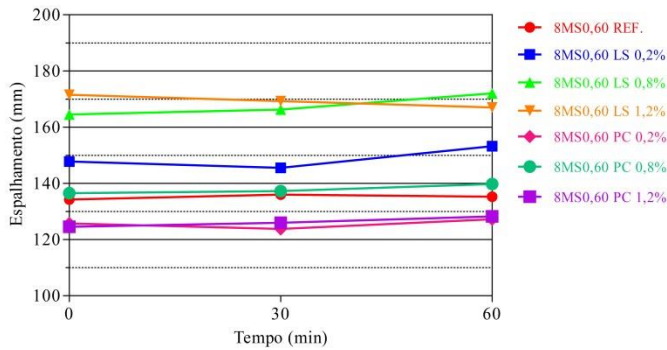


Figura 16 Resultados da manutenção do espalhamento das misturas de traço 12MS0,50.

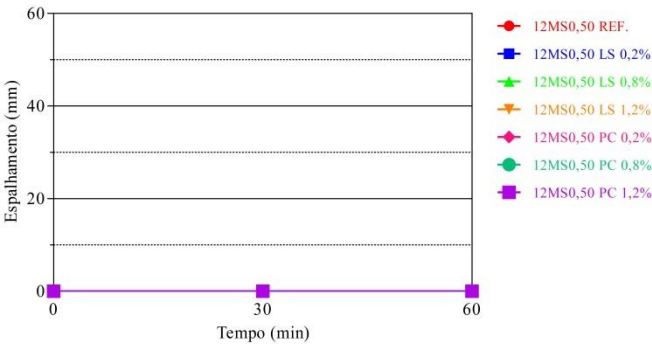


Figura 17 Resultados da manutenção do espalhamento das misturas de traço 12MS0,55.

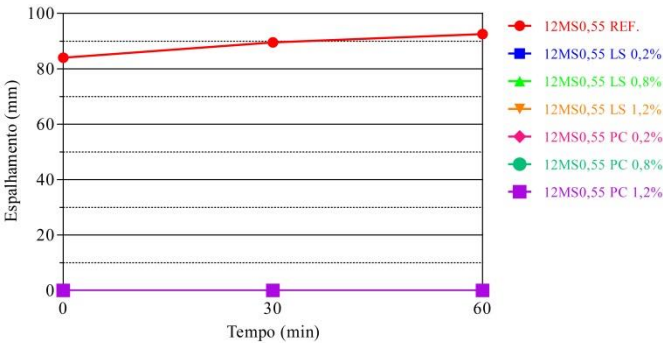
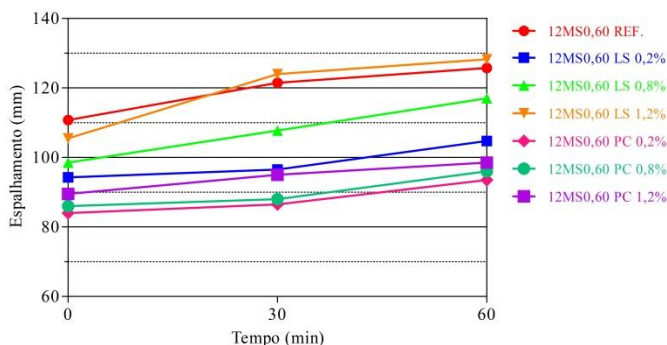


Figura 18 Resultados da manutenção do espalhamento das misturas de traço 12MS0,60.



Observando os resultados plotados nos gráficos, nota-se que as misturas de referência, ou seja, sem aditivo, tendem a ter um comportamento que vai de fluidez constante – com manutenção do espalhamento durante os 60 minutos observados – a levemente crescente, quando o espalhamento aumenta com o passar dos minutos. No caso das misturas contendo aditivo PC, o comportamento é bem semelhante em todas as misturas e com todos os teores testados, apresentando um leve aumento no espalhamento com o passar do tempo na grande maioria dos casos. Já no caso das misturas com aditivo LS, não foi possível observar uma tendência de comportamento uma vez que este variou demais. Em alguns casos o espalhamento se mostrou crescente, em outros, decrescente. Em alguns casos o espalhamento teve uma queda inicial com posterior aumento e em outros, se manteve constante.

Como não foram encontrados outros trabalhos acadêmicos que englobem a avaliação da manutenção do espalhamento, não foi possível fazer uma comparação de tendências neste caso.

Com o objetivo de observar de forma mais clara o comportamento dos aditivos e seus teores, são apresentados nas Figuras 19 a 30 gráficos de espalhamento agrupados por etapas (espalhamento inicial, após 30 minutos da confecção das misturas e após 60 minutos). Vale mencionar que não foram feitos gráficos nesta modalidade referentes às misturas 12MS0,50 e 12MS0,55, pois as mesmas não apresentaram espalhamento quando utilizados os aditivos, assim como mostrado anteriormente nas Figuras 16 e 17.

Figura 19 Resultados do espalhamento inicial das misturas de traço 8MS0,50.

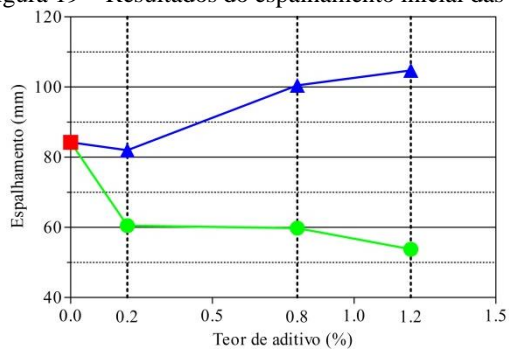


Figura 20 Resultados do espalhamento das misturas de traço 8MS0,50 após 30 min.

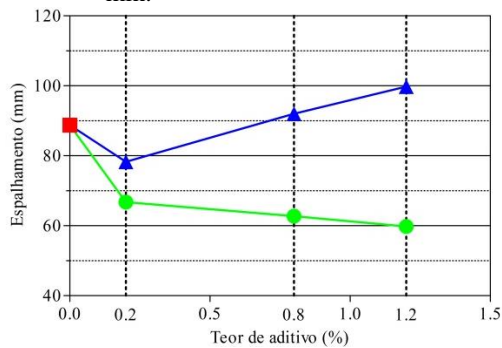


Figura 21 Resultados do espalhamento das misturas de traço 8MS0,50 após 60 min.

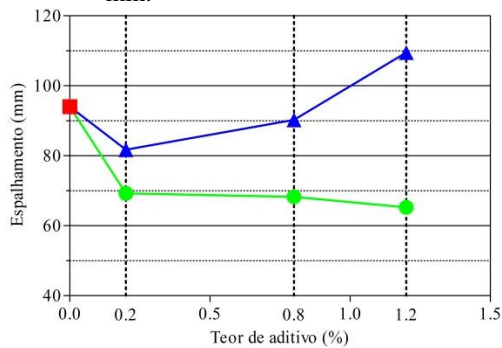


Figura 22 Resultados do espalhamento inicial das misturas de traço 8MS0,55.

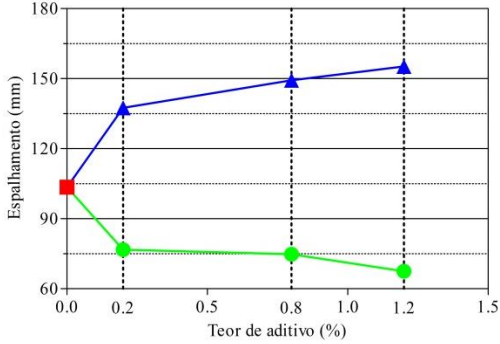


Figura 23 Resultados do espalhamento das misturas de traço 8MS0,55 após 30 min.

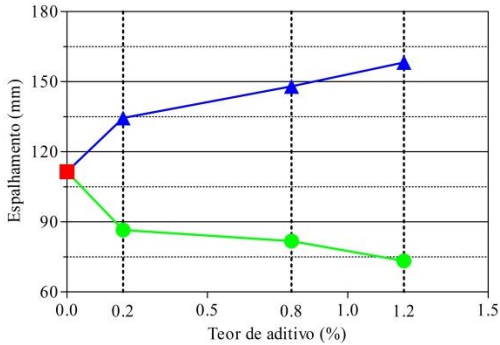


Figura 24 Resultados do espalhamento das misturas de traço 8MS0,55 após 60 min.

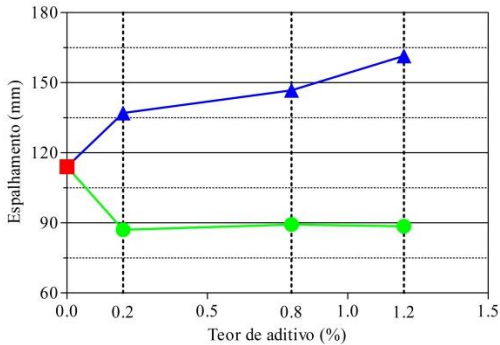


Figura 25 Resultados do espalhamento inicial das misturas de traço 8MS0,60.

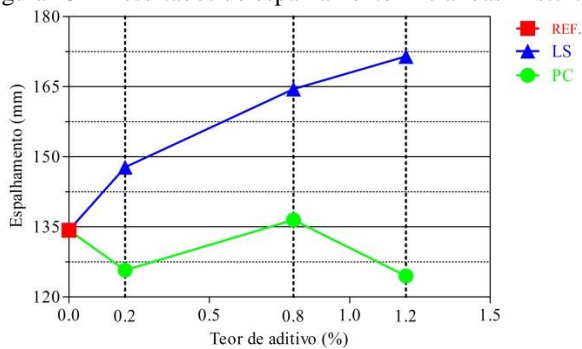


Figura 26 Resultados do espalhamento das misturas de traço 8MS0,60 após 30 min.

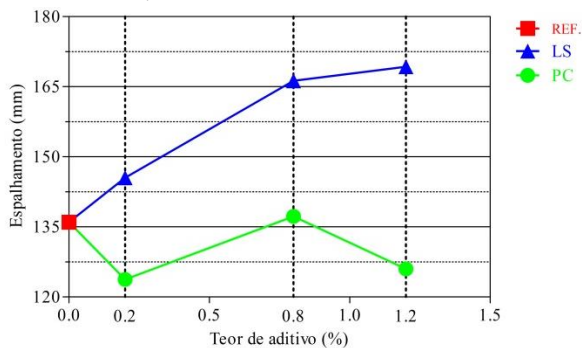


Figura 27 Resultados do espalhamento das misturas de traço 8MS0,60 após 60 min.

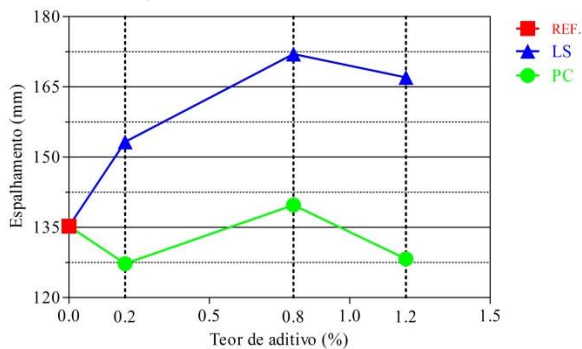


Figura 28 Resultados do espalhamento inicial das misturas de traço 12MS0,60.

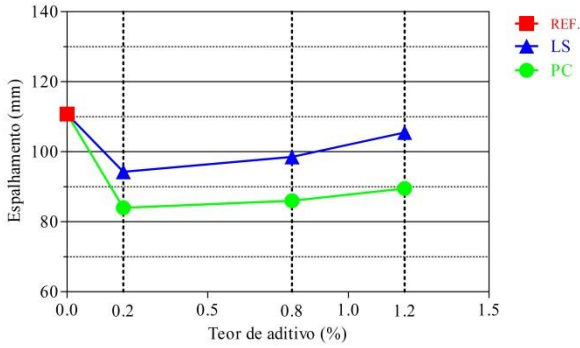


Figura 29 Resultados do espalhamento das misturas de traço 12MS0,60 após 30 min.

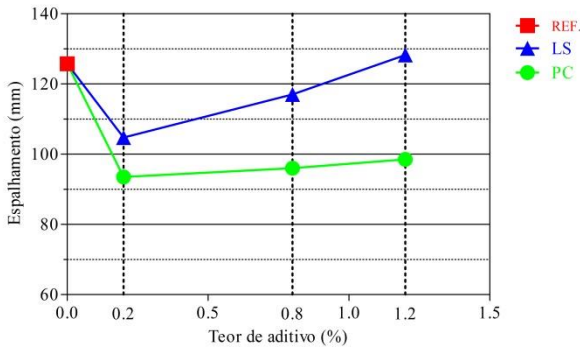
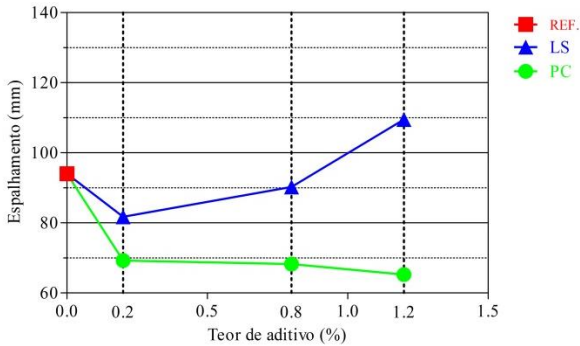


Figura 30 Resultados do espalhamento das misturas de traço 12MS0,60 após 60 min.



Observando os gráficos é possível estabelecer algumas relações entre o espalhamento e as variáveis de forma geral:

- a) o espalhamento da pasta diminuiu com o aumento da molaridade da solução ativadora (M);
- b) o espalhamento das pastas aumentou com o aumento da razão solução ativadora/cinza volante (S);
- c) o aditivo à base de lignossulfonato (LS) foi mais eficiente ao fornecer fluidez às pastas do que o aditivo à base de policarboxilato (PC).

Quanto às relações entre a molaridade da solução ativadora (M), a razão solução ativadora/cinza volante (S) e o espalhamento das pastas (itens a) e b)), estas se estabeleceram de acordo com o observado em outros trabalhos, como o trabalho de Livi (2013). A explicação para estas duas observações é a mesma e é baseada na quantidade de água presente nas misturas. Uma solução com concentração 12M tem mais soluto e, conseqüentemente, menos solvente do que uma solução com concentração 8M. Portanto, misturas com solução a 12M tem menos água para lubrificar as partículas. No caso da relação observada entre o espalhamento e a relação solução ativadora/cinza volante (S), exemplifica-se da seguinte forma: em uma pasta com relação solução ativadora/cinza volante (S) igual a 0,60 existe mais solução se comparada a pastas com relação S igual a 0,50 e 0,55. Sendo assim, quanto maior a relação S, maior a quantidade de solução e, conseqüentemente, maior a quantidade de água na mistura.

Estas relações entre a quantidade de água na mistura e o espalhamento podem ser observadas de forma bastante pronunciada comparando as pastas de traço 12MS0,50, 12MS0,55 e 12MS0,60 com as pastas de mesmo traço, porém com solução a 8M. Todas as pastas com solução a 12M apresentaram valores de espalhamento muito menores do que os obtidos nas pastas de traço correspondente, porém com solução a 8M. As pastas com concentração da solução igual a 12M, de um modo geral, são pastas bastante secas, consistentes e muito difíceis de moldar. No caso das pastas 12MS0,50 e 12MS0,55 o espalhamento chegou a ser nulo com todos os teores e tipos de aditivo testados, com exceção a pasta 12MS0,55 REF. Isso demonstra a relação entre a molaridade da solução e a razão solução ativadora/cinza volante e o espalhamento das misturas. O comportamento destas pastas revela, ainda, a falta de eficiência de ambos os aditivos em fluidificar as pastas com solução 12M.

Quanto ao comportamento dos aditivos, pode-se dizer que era esperado que o aditivo à base de policarboxilato tivesse um melhor



desempenho em comparação com o lignossulfonato, já que ele conta com modos de ação complementares, a repulsão eletrostática e a repulsão estérica. Enquanto o lignossulfonato conta somente com a repulsão eletrostática para dispersar as partículas.

Em contradição com o observado nesta Dissertação e no trabalho de Laskar e Bhattacharjee (2012), Criado et al. (2009) obtiveram uma melhor atuação do aditivo PC em relação ao LS, além da ocorrência de segregação da mistura quando utilizado aditivo à base de lignossulfonato.

Criado et al. (2009) investigaram os efeitos de aditivos à base de melamina, lignossulfonato e policarboxilato em argamassas geopoliméricas de cinza volante ativadas com uma combinação de hidróxido de sódio e silicato de sódio. Neste caso, a solução ativadora teve concentração molar de 12,5M, a relação solução ativadora/cinza volante igual a 0,40 e o teor de aditivo utilizado foi de 0,8% em relação à massa de cinza volante para todas as bases químicas. Os autores obtiveram bons resultados com o uso do aditivo à base de policarboxilato, com aumento de aproximadamente 10% no espalhamento em relação à mistura de referência. Já os aditivos à base de melamina e lignossulfonato foram considerados ineficazes pelos autores, pois reduziram o espalhamento em 25 e 50% respectivamente.

Laskar e Bhattacharjee (2012) obtiveram resultados melhores com o uso de lignossulfonato do que com policarboxilato em concretos geopoliméricos de cinza volante ativados com uma combinação de hidróxido de sódio e seu silicato. Estes autores obtiveram uma melhora no espalhamento comparado à mistura de referência com o uso de ambos os aditivos nos teores de 1 e 1,5% em relação à massa de cinza volante. Essa melhora foi observada com uma concentração da solução de 1,5M. Quando a concentração foi aumentada para 4M, o efeito de ambos os aditivos foi considerado insignificante, mantendo-se o mesmo da mistura de referência. Para concentrações maiores do que 4M, houve uma redução brusca no espalhamento das misturas contendo ambos os aditivos com ambos os teores. Porém, vale ressaltar que, para todas as concentrações testadas, exceto 1,5M, o aditivo LS teve um melhor desempenho em relação ao aditivo PC.

O mesmo aconteceu no presente trabalho. O aditivo LS melhorou o espalhamento da mistura em relação à referência em quase todos os casos quando a concentração da solução era igual a 8M, exceto no caso da mistura 8MS0,50 LS 0,2%, possivelmente por ser um teor insuficiente. Com o aumento da concentração da solução para 12M, o desempenho do aditivo à base de lignossulfonato piorou, sendo que

nenhuma das misturas com aditivo teve melhora no espalhamento em relação à mistura de referência.

Já o aditivo PC reduziu o espalhamento de todas as misturas em relação à referência. Um exemplo bem claro dessa redução pode ser percebido comparando a mistura de referência 8MS0,50 com suas correspondentes contendo aditivo PC. Uma mistura trabalhável e relativamente fluida se tornou inviável ao uso após a adição de 0,2; 0,8 e 1,2% de aditivo à base de policarboxilato, pois a moldagem dos corpos de prova foi muito dificultada.

Com base nessa dificuldade de moldagem e manuseio de algumas misturas, definiu-se um valor de espalhamento maior ou igual a 80 mm para delimitar a zona trabalhável do material. A trabalhabilidade não é uma característica intrínseca do material, uma vez que está vinculada à natureza da sua utilização. Isso torna a trabalhabilidade um conceito difícil de definir de forma quantitativa. Além da utilização, a trabalhabilidade ainda depende de características observadas pelo pesquisador/usuário durante a confecção e aplicação do material e é importante que estes dados sejam registrados juntamente com os dados quantitativos.

A partir dessas observações pôde-se perceber um possível excesso de aditivo LS quando utilizado o teor 1,2% nas misturas de traço 8MS0,55 e 8MS0,60, onde esse possível excesso foi observado também para o teor 0,8%, porém em menor quantidade. Nestes casos, após os 30 minutos em que a pasta ficava em descanso entre uma medição e outra do espalhamento, percebeu-se a ocorrência de segregação nas misturas. A mistura possuía uma separação bastante definida em duas fases, onde a fase inferior era densa e a fase superior apresentava sinais de exsudação de aditivo na forma de nata. O mesmo foi observado por Laskar e Bhattacharjee (2012) com 1,5% de aditivo LS.

Palacios e Puertas (2004)<sup>8</sup> (apud LASKAR; BHATTACHARJEE, 2012) e Palacios e Puertas (2005) perceberam mudanças no espectro infravermelho de um aditivo à base de naftaleno sulfonado em solução mista de hidróxido de sódio e silicato de sódio. Essas mudanças no espectro foram atribuídas a alterações nos grupos sulfônicos responsáveis pelo efeito plastificante. Isso fez com que Laskar e Bhattacharjee (2012) acreditassem que é possível que os

---

<sup>8</sup> PALACIOS, M., PUERTAS, F.. Stability of superplasticiser and shrinkage-reducing admixtures in high basic media. **Mater. Construct.**, v. 54, i. 276, p. 65-86, 2004.

aditivos à base de lignossulfonato também possam sofrer alterações na sua estrutura, que poderia explicar a ocorrência de segregação nas misturas contendo maior quantidade deste material.

Quanto às diferenças entre o desempenho dos dois aditivos investigados, policarboxilato e lignossulfonato, não foi possível detectar a razão pela qual o aditivo LS confere maior dispersão do que o aditivo PC. Laskar e Bhattacharjee (2012) e Criado et al. (2009) acreditam que o modo de ação dos aditivos possa ser completamente diferente daquele descrito para sistemas à base de cimento Portland. Sabe-se que aditivos à base de policarboxilato em sistemas à base de cimento Portland formam complexos com os íons  $\text{Ca}^{2+}$  formados nas fases iniciais da hidratação do cimento. No caso de um sistema geopolimérico de cinza volante, não existem íons  $\text{Ca}^{2+}$  dissolvidos ou existem em quantidades muito pequenas. Portanto, o modo de ação pelo qual o aditivo fluidifica a mistura em sistemas geopoliméricos de cinza volante ainda é desconhecido. Por esse mesmo motivo, não está claro o porquê de o aditivo à base de lignossulfonato ter melhor desempenho do que o aditivo à base de policarboxilato.

Acredita-se que a mudança no modo de ação dos aditivos possa estar relacionada com a questão da estabilidade dos aditivos em meio alcalino, como investigado por Palacios e Puertas (2005). Estes autores observaram mudanças na estrutura de diversos aditivos químicos quando em meio alcalino, inclusive de aditivos à base de policarboxilato, porém não foi abordada neste trabalho a estabilidade dos lignossulfonatos.

Em resumo, o entendimento sobre o funcionamento de ambos os aditivos em sistemas geopoliméricos de cinza volante continua sendo uma incógnita e investigações mais aprofundadas precisam ser feitas para tentar explicar estes fenômenos.

## 4.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

### 4.2.1 Determinação da resistência à flexão

Na sequência são apresentados os gráficos confeccionados a partir dos resultados de resistência à flexão agrupados por traço (Figuras 31 a 36).

Vale lembrar que as Tabelas 12 a 19, contendo os resultados da análise estatística de forma resumida, são apresentadas no APÊNDICE IV.

Figura 31 Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço 8MS0,50.

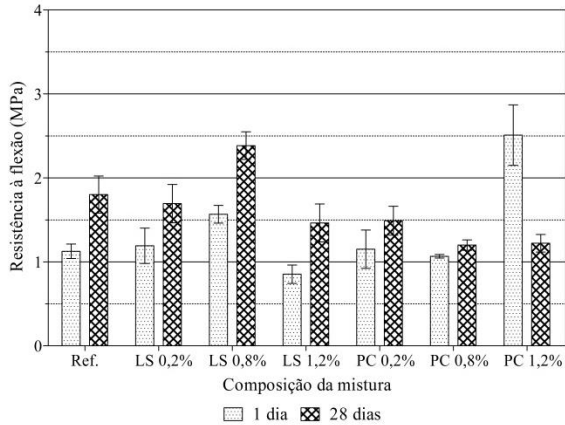


Figura 32 Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço 8MS0,55.

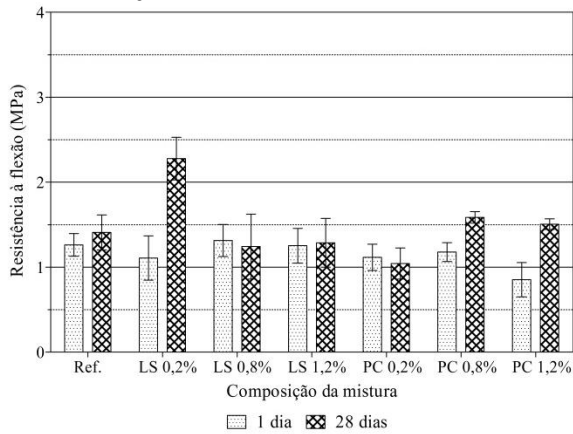


Figura 33 Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço 8MS0,60.

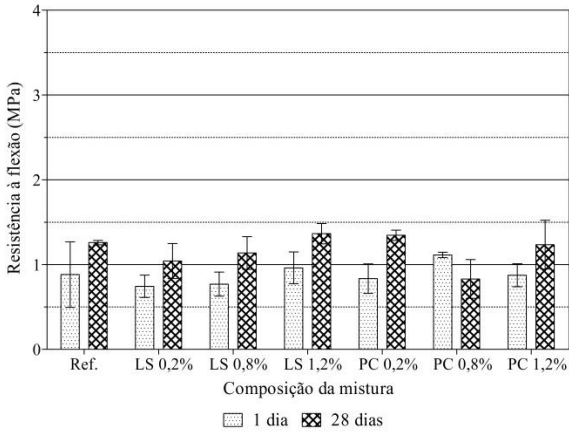


Figura 34 Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço 12MS0,50.

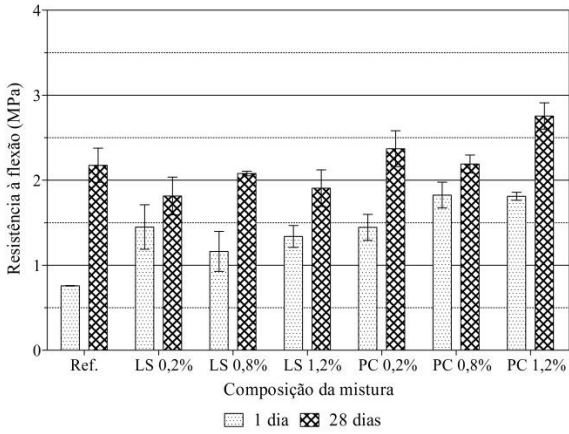


Figura 35 Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço 12MS0,55.

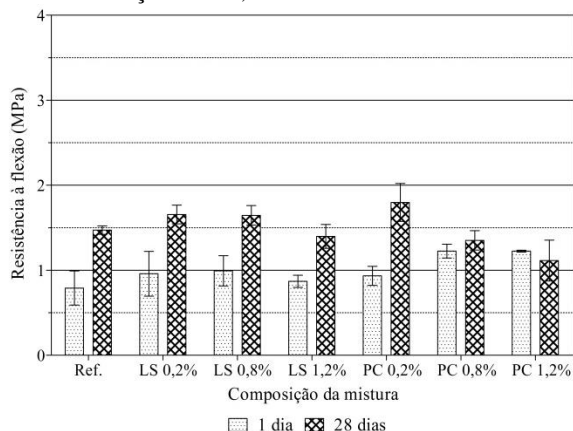
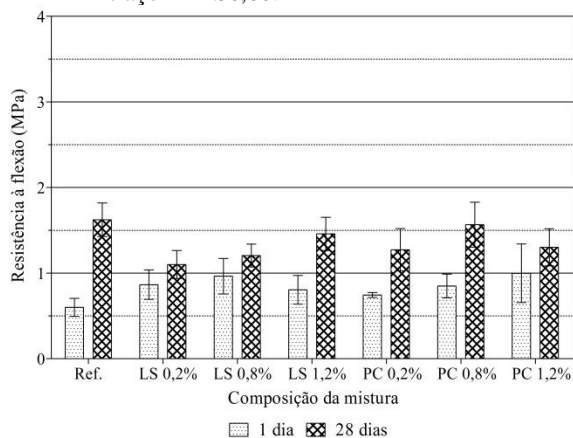


Figura 36 Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço 12MS0,60.



Com base nos resultados apresentados, é possível verificar se existe ganho de resistência do 1<sup>o</sup> ao 28<sup>o</sup> dia e, ainda, se existe influência do uso dos diferentes aditivos e seus teores em relação à mistura de referência.

Ainda que os valores de resistência à flexão sejam baixos, as pastas com solução ativadora a 12M apresentaram, em sua maioria, evolução na resistência do 1<sup>o</sup> ao 28<sup>o</sup> dia, principalmente, nas pastas com

relação S igual a 0,50 e 0,55. Isso foi confirmado pela análise estatística apresentada na Tabela 12 (APÊNDICE IV).

O mesmo não aconteceu para as misturas ativadas por solução a 8M, principalmente aquelas com relação S igual a 0,55 e 0,60. Estas misturas apresentaram, em sua maioria, valores muito semelhantes de resistência à flexão com 1 e 28 dias. Isso pode ser observado com facilidade nos gráficos e é confirmado pela análise estatística (Tabela 12, APÊNDICE IV), sendo aceitas como estatisticamente equivalentes.

Vale destacar a situação da mistura 8MS0,50 com 1,2% de lignossulfonato, que teve um decréscimo de resistência à flexão muito significativo ( $P < 0,01$ ) do 1º ao 28º dia. O mesmo foi observado por Livi (2013) em sua mistura de traço 16MS0,55 sem o uso de aditivo.

Palacios e Puertas (2005) perceberam a ocorrência de desenvolvimento de resistência à flexão do 2º ao 28º dia para argamassas geopoliméricas de escória de alto forno ativadas com hidróxido de sódio. Para as misturas de referência, a resistência passou de aproximadamente 3 MPa para 4,5 MPa, já as misturas contendo 1% de policarboxilato em relação à massa de escória tiveram um ganho aproximadamente 1,7 MPa, passando de 3,8 MPa aos 2 dias de idade para 5 MPa aos 28 dias.

Quanto ao efeito dos aditivos e seus teores nas misturas, pode-se dizer, com base nos resultados apresentados nos gráficos e na análise estatística (Tabela 13, APÊNDICE IV), que os aditivos utilizados influenciaram mais a resistência à flexão inicial (1 dia) das misturas do que a resistência à flexão aos 28 dias. Comparando todas as misturas confeccionadas com aditivo às suas misturas de referência com 1 dia, houve influência significativa na resistência à flexão em 12 misturas das 36. Todas as 12 misturas apresentaram aumento na resistência à flexão, exceto a mistura 8MS0,55 contendo 1,2% de policarboxilato que registrou uma redução de 1,26 MPa registrados com 1 dia de idade para 0,85 MPa, aos 28 dias. O caso em que o aumento de resistência foi o mais notável foi o da mistura 8MS0,50 com 1,2% de policarboxilato. Porém, como citado anteriormente, esta mistura foi a única a ter um comportamento anômalo, registrando menor resistência à flexão aos 28 dias de idade do que no primeiro dia.

Vale ressaltar ainda que, ambos os aditivos em todos os teores utilizados, tiveram efeito positivo significativo na resistência à flexão com 1 dia de idade nas misturas de traço 12MS0,50, aumentando a resistência à flexão em relação à referência. Porém, como citado no item 4.1, estas misturas não foram consideradas trabalháveis de acordo com o

limite estabelecido neste trabalho (zona trabalhável: espalhamento  $\geq 80$  mm).

Ainda é válido destacar que, das 12 misturas onde houve influência do aditivo na resistência à flexão com 1 dia, 8 são misturas contendo aditivo à base de policarboxilato e somente 4, contendo lignossulfonato. Com base nisso, pode-se afirmar que o aditivo à base de policarboxilato foi o que mais influenciou a resistência à flexão inicial das misturas.

Quanto aos resultados com 28 dias de idade, a influência dos aditivos foi bastante variada. Porém, observa-se nos resultados plotados nos gráficos e também na análise estatística que as misturas 8MS0,55 e 8MS0,60, as mais fluidas e trabalháveis de todo o programa experimental, praticamente não apresentaram influência dos aditivos e seus teores na resistência à flexão aos 28 dias. Somente os teores de 0,2% de lignossulfonato e 0,8% de policarboxilato afetaram a resistência à flexão das misturas 8MS0,50 e 8MS0,60, respectivamente. Nos casos citados, a presença de lignossulfonato aumentou a resistência à flexão aos 28 dias em 0,58 MPa e o policarboxilato, que reduziu a mesma em 0,43 MPa.

Palacios e Puertas (2005) obtiveram aumento na resistência à flexão com o uso de aditivo à base de policarboxilato, ainda que em geopolímeros de escória ativados por hidróxido de sódio que foram rompidos nas idades de 2, 7 e 28 dias. Aos 2 dias da idade as misturas tiveram um ganho de menos de 1 MPa com o uso do aditivo que passou de 3 MPa para 3,8 MPa. Aos 7 dias, o ganho foi aproximadamente o mesmo, passando de 4,2 MPa para 5 MPa com o uso do aditivo. E aos 28 dias o ganho foi um pouco menor, de aproximadamente 0,5 MPa, passando de 4,5 MPa para 5 MPa com o uso do aditivo.

Na sequência são apresentados os gráficos contendo os resultados de resistência à flexão agrupados pela molaridade (M), com o objetivo de verificar se existe influência da relação solução ativadora/cinza volante (S) na resistência à flexão (Figuras 37 e 38).



Figura 37 Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço 8M.

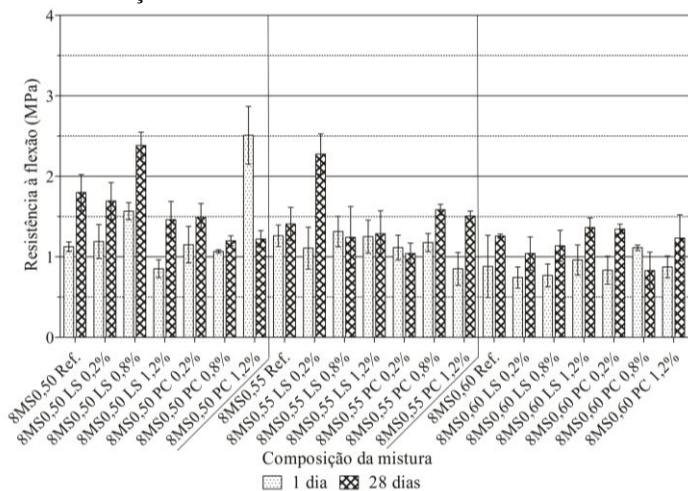
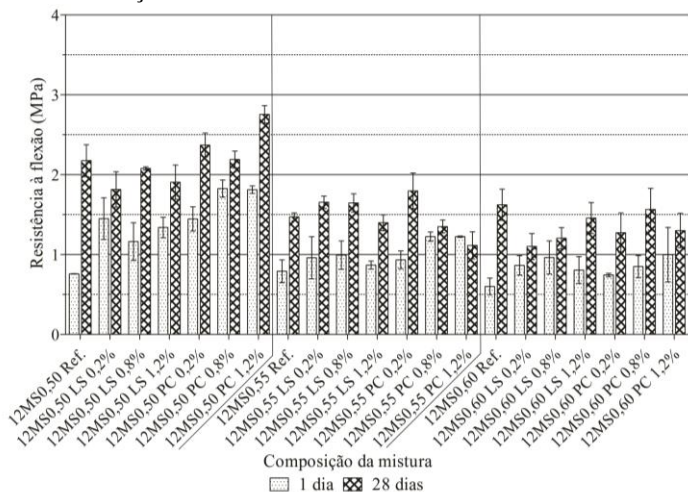


Figura 38 Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço 12M.



Observando os resultados plotados nos gráficos, é possível notar a influência da relação S na resistência à flexão, confirmada pela análise estatística exibida na Tabela 14 (APÊNDICE IV). Essa influência fica ainda mais evidente no gráfico que reúne as misturas com solução

ativadora a 12M (Figura 38), onde pode-se observar a tendência à redução da resistência à flexão com o aumento da relação S nitidamente.

Através da análise estatística (Tabela 14, APÊNDICE IV) foram obtidos exatamente os mesmos resultados para as misturas com solução a 8M e 12M. Estes resultados mostram que existe influência da relação S, principalmente quando são comparadas as relações mais extremas (0,50 e 0,60). Estes cruzamentos foram os que apresentaram maior ocorrência de diferenças significativas nos resultados de resistência à flexão.

Fazendo o cruzamento entre as misturas de referência, a análise estatística revelou diferença significativa para quase todos os casos, exceto para o cruzamento dos traços S0,55 e S0,60 com ambas as idades e concentrações de solução. O mesmo comportamento foi observado no cruzamento dos traços S0,55 e S0,60 contendo 0,8% e 1,2% de aditivo policarboxilato, também para ambas as idades e concentrações.

Vale destacar também os resultados obtidos para as misturas contendo 0,8% de lignossulfonato que mostraram diferença significativa para todos os cruzamentos com 1 dia de idade e as misturas contendo 0,2% de policarboxilato que, ao contrário, não mostraram diferença significativa em nenhum dos cruzamentos com 1 dia de idade.

Na sequência são apresentados os gráficos contendo os resultados de resistência à flexão agrupados pela relação solução ativadora/cinza volante (S), com o objetivo de verificar se existe influência da molaridade (M) na resistência à flexão (Figuras 39 a 41).

Figura 39 Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço S0,50.

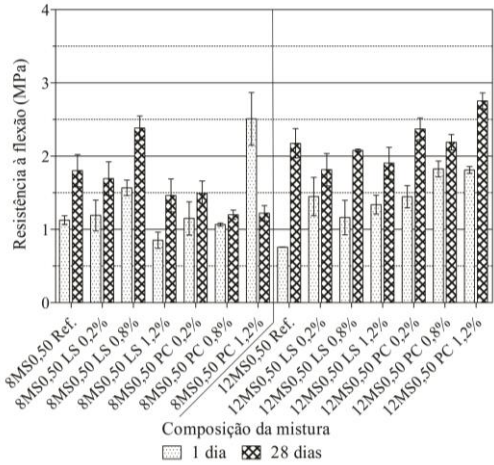


Figura 40 Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de S0,55.

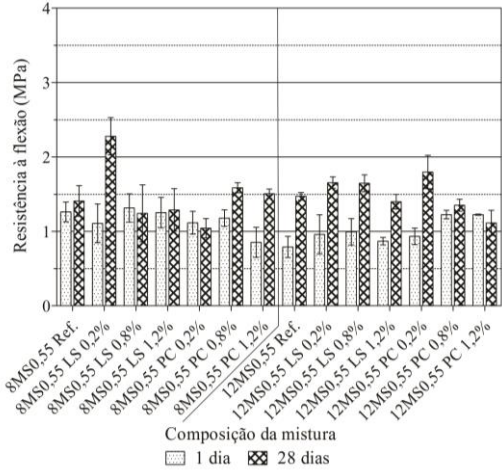
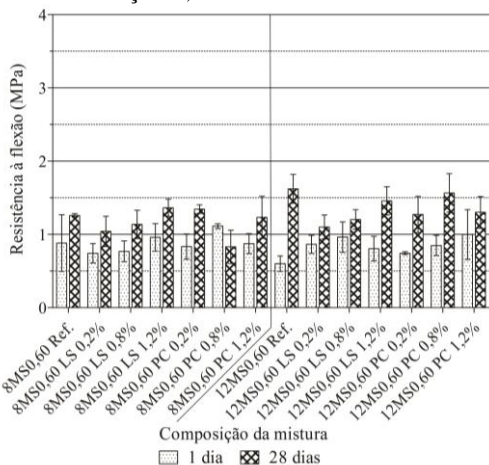


Figura 41 Resultados da determinação da resistência à flexão nas misturas de traço S0,60.



Observando os resultados plotados nos gráficos e também com base nos resultados da análise estatística (Tabela 15, APÊNDICE IV), pode-se dizer se a ocorrência ou não de influência da concentração molar da solução na resistência à flexão dependeu da relação S das misturas.

A influência da concentração molar da solução é notada nas pastas menos fluidas, ou seja, com relação S igual a 0,50. Neste caso, houve diferença significativa no cruzamento de 5 de 7 traços com 1 e 28 dias. Com 1 dia de idade, o aumento da concentração reduziu a resistência à flexão em todos os traços com relação S igual a 0,50, exceto pelo traço contendo 1,2% de aditivo LS. Pelo contrário, aos 28 dias houve aumento significativo em todos os traços onde houve influência significativa do aumento da concentração molar da solução.

Para as pastas com S igual a 0,55 o comportamento foi bastante variado, sendo observada diferença significativa em 3 cruzamentos com 1 dia e 4 cruzamentos com 28 dias.

Nas pastas com relação S igual a 0,60, não houve diferença significativa em nenhuma das pastas com 1 dia de idade. Aos 28 dias de idade, somente o cruzamento entre as pastas de referência e entre as pastas contendo 0,8% de policarboxilato apresentaram acréscimo significativo de resistência com o aumento da concentração da solução ativadora.

## 4.2.2 Determinação da resistência à compressão

Na sequência são apresentados os gráficos confeccionados a partir dos resultados de resistência à compressão agrupados por traço (Figuras 42 a 47).

Vale lembrar que as Tabelas 12 a 19, contendo os resultados da análise estatística de forma resumida, são apresentadas no APÊNDICE IV.

Figura 42 Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço 8MS0,50.

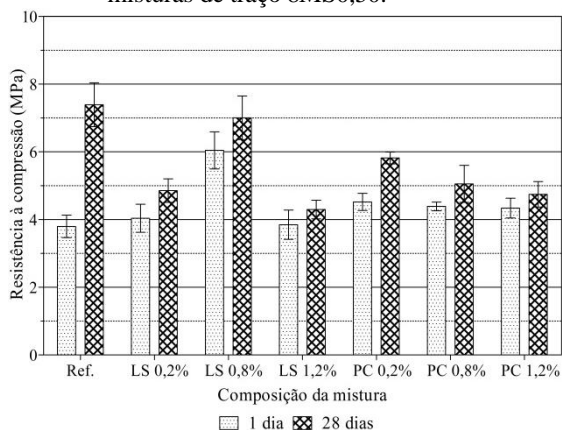


Figura 43 Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço 8MS0,55.

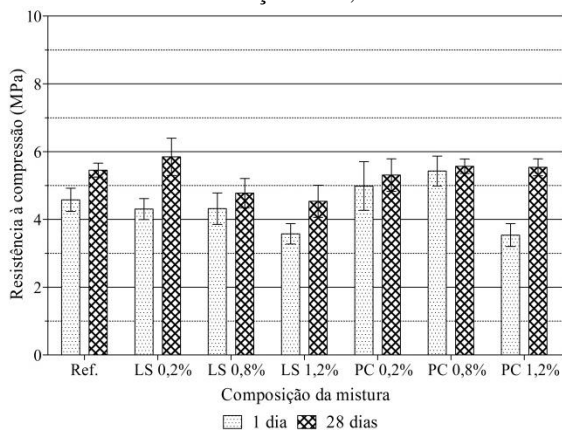


Figura 44 Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço 8MS0,60.

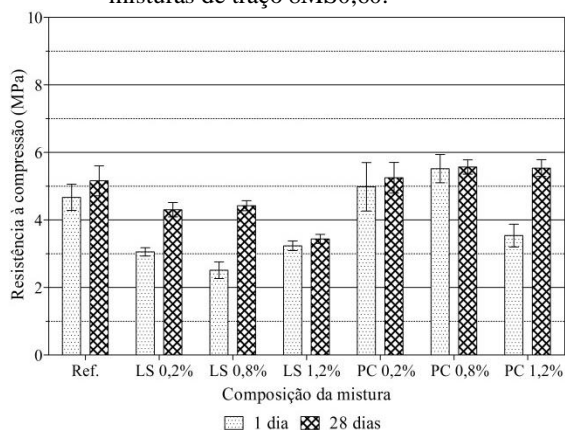


Figura 45 Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço 12MS0,50.

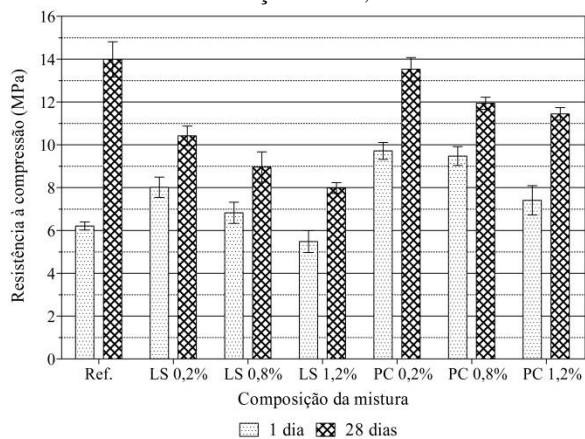


Figura 46 Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço 12MS0,55.

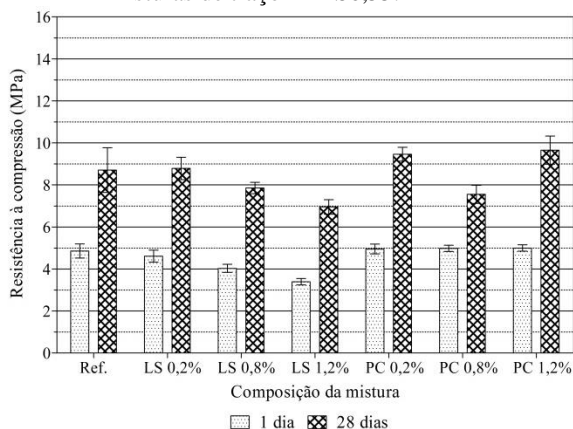
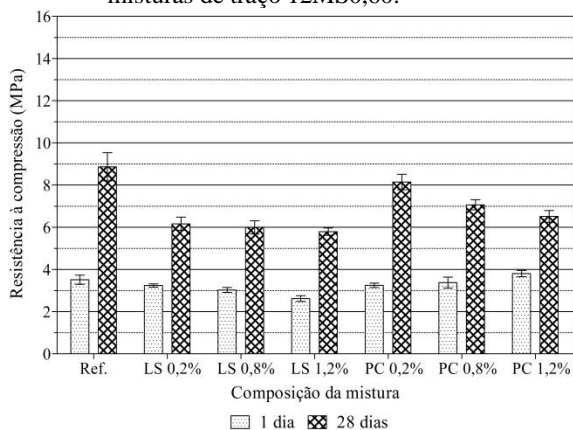


Figura 47 Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço 12MS0,60.



Com bases nos gráficos apresentados, é possível verificar se existe ou não um ganho de resistência do 1º ao 28º dia ou ainda se existe influência do uso dos diferentes aditivos e seus teores em relação à mistura de referência.

Observa-se que as pastas com solução ativadora a 12M apresentaram, em sua totalidade, um ganho expressivo de resistência ao longo do tempo. Isso foi confirmado pela análise estatística apresentada

na Tabela 16 (APÊNDICE IV), onde todas as misturas com solução a 12M se mostraram influenciadas pela idade do rompimento.

Dentre as misturas com solução a 12M, vale destacar as mistura com maior ganho. As misturas de referência 12MS0,50 e 12MS0,60 cujas resistências cresceram 7,78 MPa e 5,35 MPa, respectivamente, e as misturas 12MS0,55 PC 1,2% e 12MS0,60 PC 0,2% que cresceram 4,66 MPa e 4,90 MPa, respectivamente, do 1º ao 28º dia.

O mesmo não aconteceu para as misturas ativadas por solução a 8M, principalmente aquelas com relação S igual a 0,60, das quais apenas as misturas contendo 0,2 e 0,8% de aditivo LS e 1,2% de aditivo PC, que registraram ganhos de 1,25 MPa, 1,91 MPa e 2 MPa, respectivamente. Foram 10 entre as 21 misturas com solução a 8M que não apresentaram ganho significativo de resistência à compressão do 1º ao 28º dia. Dentre estas 10 misturas aceitas como iguais estatisticamente, 6 continham aditivo policarboxilato e 4, lignossulfonato. Dentre as 11 misturas onde foi observado aumento significativo, destaca-se a mistura de referência 8MS0,50 com o maior ganho de resistência que passou de 3,80 MPa para 7,39 MPa, registrando um aumento de 3,59 MPa.

Palacios e Puertas (2005) perceberam a ocorrência de desenvolvimento de resistência à compressão do 2º ao 28º dia para argamassas geopoliméricas de escória de alto forno ativadas com hidróxido de sódio. Para as misturas de referência, a resistência passou de aproximadamente 7 MPa para 19 MPa, já as misturas contendo 1% de policarboxilato em relação à massa de escória tiveram um ganho aproximadamente 11 MPa, passando de 10 MPa aos 2 dias de idade para 20 MPa aos 28 dias.

Quanto ao efeito dos aditivos e seus teores nas misturas, pode-se dizer com base nos resultados apresentados nos gráficos e na análise estatística (Tabela 17, APÊNDICE IV) que os aditivos utilizados exerceram maior influência na resistência à compressão tardia (28 dias) das misturas.

Comparando todas as misturas confeccionadas com aditivo às suas misturas de referência aos 28 dias, houve diferença significativa na resistência à compressão de 26 misturas das 36 totais.

Todas as 26 misturas apresentaram redução na resistência à compressão, exceto as misturas 12MS0,55 contendo 0,2 e 1,2% de policarboxilato, onde foram observados ganhos de apenas 0,76 MPa e 0,95 MPa em relação à referência. Ainda, como citado no item 4.1, essas misturas tiveram valores de espalhamento fora da zona trabalhável



definida neste trabalho, apresentando muita dificuldade na moldagem dos corpos de prova.

Dentre os casos onde houve redução da resistência à compressão com o uso de aditivo, a caso em que a redução foi mais notável foi o da mistura 12MS0,50 com 1,2% de lignossulfonato, onde houve uma redução de 43% na resistência à compressão que passou de 13,99 MPa para 7,98 MPa com o uso do aditivo.

Quanto aos resultados com 1 dia de idade, a influência dos aditivos foi bastante variada. Os traços que sofreram influência em maior parte das misturas foram 8MS0,60 e 12MS0,50, dos quais somente as misturas de traço 8MS0,60 PC 0,2% e 12MS0,50 LS 0,8% não foram influenciadas.

O aditivo à base de lignossulfonato reduziu a resistência inicial de todas as misturas onde ele exerceu influência significativa, exceto na mistura 8M0,50 LS 0,8% e 12MS0,50 LS 0,2%. Enquanto o aditivo à base e policarboxilato atuou de forma positiva nas misturas de traço 12MS0,50, tendo aumentado a resistência inicial em todos os teores. Com 0,2% de aditivo PC, o aumento na resistência inicial foi de 3,51 MPa em relação à referência. Com 0,8%, o aumento foi de 3,27 MPa, e com 1,2%, o aumento foi de 1,20 MPa. Neste caso, pode-se dizer que o aditivo PC melhorou a resistência inicial em relação à mistura de referência, sendo que, quanto menor o teor, maior foi o ganho de resistência. Porém, vale lembrar que nenhum dos aditivos em nenhum dos teores utilizados melhorou o espalhamento das misturas 12MS0,5. Para os traços 12MS0,55 e 12MS0,60 não foi verificada influência significativa de nenhum dos teores do aditivo PC na resistência inicial.

De modo geral, pode-se dizer que houve um aumento na resistência inicial com o uso do aditivo à base de policarboxilato tanto para as misturas com solução ativadora a 8M quanto a 12M. Essa melhora foi observada, em alguns casos, até mesmo na resistência tardia. Porém, sua atuação no estado fresco foi prejudicial às misturas, tendo reduzido o espalhamento das mesmas. Já o aditivo à base de lignossulfonato, que atuou de forma positiva no espalhamento das misturas com solução a 8M, principalmente, prejudicou a resistência à compressão, reduzindo de forma significativa tanto a resistência inicial quanto a resistência tardia da maioria das misturas onde foi aplicado.

Palacios e Puertas (2005) obtiveram aumento na resistência à compressão com o uso de aditivo à base de policarboxilato, ainda que em geopolímeros de escória ativados por hidróxido de sódio que foram rompidos nas idades de 2, 7 e 28 dias. Aos 2 dias da idade as misturas tiveram um ganho de aproximadamente 3 MPa com o uso do aditivo que

passou de 7 MPa para 10 MPa. Aos 7 dias, o ganho foi aproximadamente o mesmo, passando de 12 MPa para 15 MPa com o uso do aditivo. E aos 28 dias o ganho foi um pouco menor, de aproximadamente 2 MPa, passando de 19 MPa para 21 MPa com o uso do aditivo.

Já Nematollahi e Sanjayan (2014a) observaram influência negativa do uso de dois aditivos à base de policarboxilato de sódio em pastas geopoliméricas de cinza volante ativadas com hidróxido de sódio combinado com silicato de sódio. Com 3 dias de idade as pastas contendo 1% dos aditivos em relação à massa de cinza volante registraram resistência à compressão de 68 e 81,3 MPa enquanto a pasta de referência registrou 96,2 MPa com a mesma idade.

Na sequência são apresentados os gráficos contendo os resultados de resistência à compressão agrupados de acordo com a molaridade (M), com o objetivo de verificar se existe influência da relação solução ativadora/cinza volante (S) na resistência à compressão (Figuras 48 e 49).

Figura 48 Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço 8M.

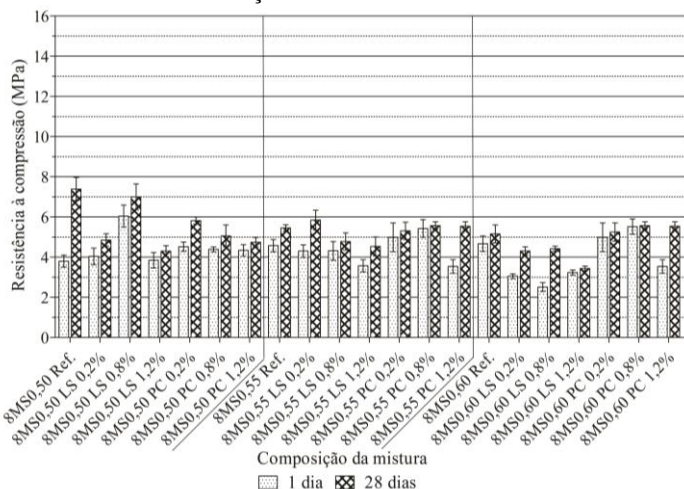
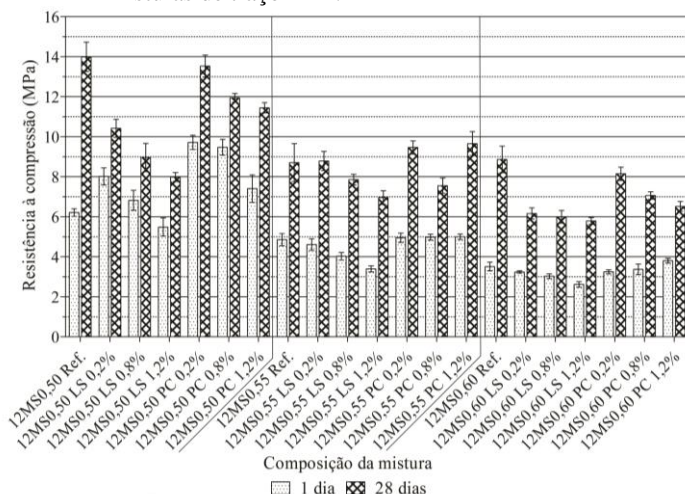


Figura 49 Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço 12M.



Com base nos resultados, é possível notar a influência da relação S na resistência à compressão. Essa relação fica ainda mais evidente na Tabela 18, onde a tendência à redução da resistência à compressão com o aumento da relação S é bem pronunciada. A análise estatística mostrada na Tabela 18 (APÊNDICE IV) confirma a tendência observada nos gráficos.

Em se tratando das misturas com concentração da solução igual a 12M, observou-se a existência de diferença significativa na resistência inicial de todas as misturas. O mesmo ocorreu para a idade de 28 dias com exceção para os cruzamentos entre os traços S0,55 e S0,60 das misturas de referência e das misturas contendo 0,8% de policarboxilato. Vale destacar as quedas mais bruscas na resistência à compressão com o aumento da relação S. Com 1 dia de idade, a mistura contendo 0,2% de policarboxilato teve uma redução de 4,77 MPa variando a relação S de 0,50 para 0,55 e 6,47 MPa variando a relação S de 0,50 para 0,60. Com 28 dias de idade, a mistura de referência teve uma queda de 5,28 MPa variando a relação S de 0,50 para 0,55 e 5,12 MPa variando a relação S de 0,50 para 0,60.

Para as misturas com concentração molar da solução 8M, a maior ocorrência de diferença significativa foi observada na idade de 28 dias. Vale destacar as quedas mais bruscas na resistência à compressão com o aumento da relação S. Com 28 dias de idade, a resistência à compressão

da mistura contendo 0,8% de lignossulfonato reduziu 2,23 MPa variando a relação S de 0,50 para 0,55 e 2,58 MPa variando a relação S de 0,50 para 0,60. Para a idade de 1 dia, a mesma mistura teve redução de 1,73 MPa com o aumento da relação S de 0,50 para 0,55 e 2,81 MPa com o aumento da relação S de 0,50 para 0,60.

Na sequência são apresentados os gráficos contendo os resultados de resistência à compressão agrupados de acordo com a relação solução ativadora/cinza volante (S), com o objetivo de verificar se existe influência da molaridade (M) na resistência à compressão (Figuras 50 a 52).

Figura 50 Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço S0,50.

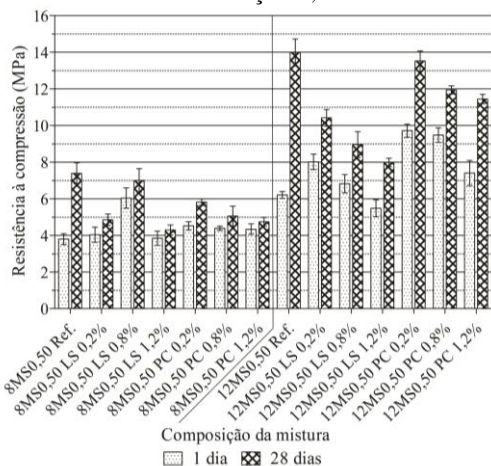


Figura 51 Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço S0,55.

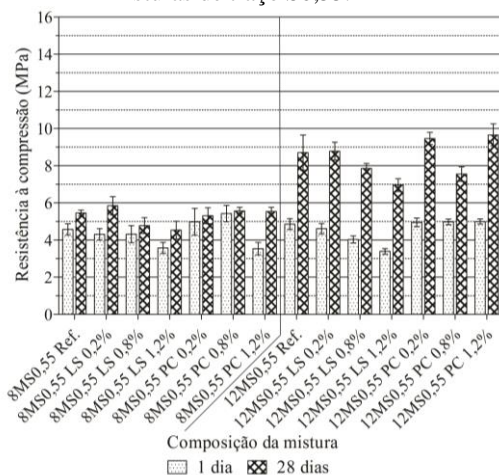
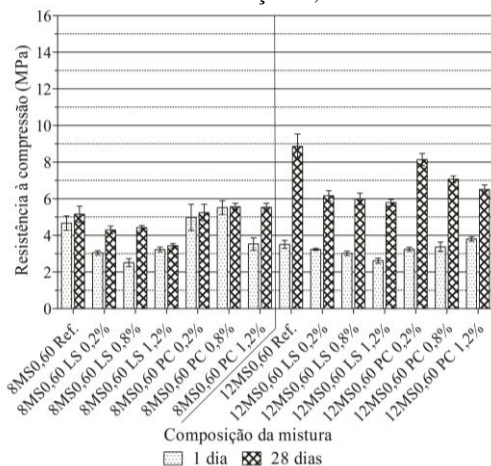


Figura 52 Resultados da determinação da resistência à compressão nas misturas de traço S0,60.



Com base nos dados plotados nos gráficos acima e nos resultados da análise estatística (0, APÊNDICE IV), pode-se dizer que houve influência significativa da concentração molar da solução ativadora na resistência à compressão na maior parte dos casos estudados.

Para a idade de 28 dias, todas as misturas foram influenciadas significativamente pela molaridade da solução de forma positiva. Ou seja, com o aumento da concentração molar da solução ativadora, a resistência tardia de todas as misturas teve um ganho significativo. Este ganho de resistência foi mais pronunciado para as misturas com relação S igual a 0,50, ou seja, as misturas mais secas.

O mesmo aconteceu ao primeiro dia de idade, todas as misturas com S igual a 0,50 tiveram ganho significativo de resistência à compressão com o aumento da molaridade da solução. As misturas com S igual a 0,55, em sua maioria não apresentaram diferença significativa, sendo aceitas como iguais estatisticamente; com exceção da mistura com 1,2% de aditivo policarboxilato, cuja resistência passou de 3,54 MPa para 5 MPa com o aumento da concentração da solução de 8M para 12M. No caso das misturas com S igual a 0,60, todas as misturas, exceto a mistura contendo 0,2% de lignossulfonato e 1,2% de policarboxilato, foram influenciadas pelo aumento da molaridade. Porém, dentre as misturas onde houve diferença significativa, somente a mistura contendo 0,8% de lignossulfonato apresentou ganho na resistência que passou de 2,51 MPa para 4,42 MPa com o aumento da molaridade. Todas as demais – REF.; LS 1,2%; PC 0,2% e PC 0,8% – foram prejudicadas pelo aumento da molaridade de forma significativa.

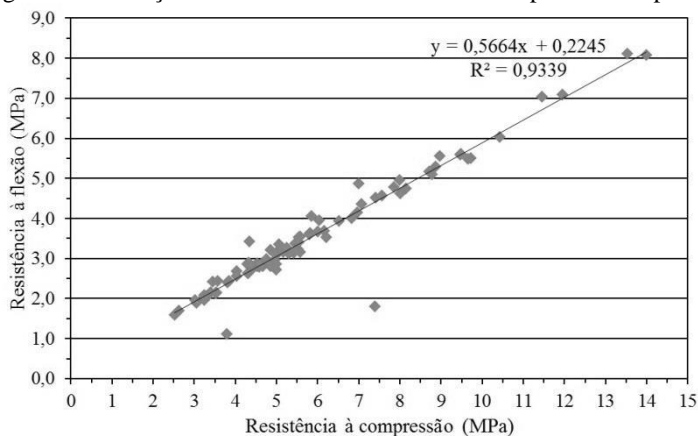
Dentre as misturas mais afetadas, destaca-se a mistura contendo 0,2% de policarboxilato que, com 1 dia de idade, registrou um ganho de 7,71 MPa com o aumento da concentração da solução ativadora de 8M para 12M. Aos 28 dias, o ganho da mesma mistura foi de 5,2 MPa.

#### **4.2.3 Relação entre resistência à flexão e resistência à compressão**

Uma vez que não existem muitos trabalhos que abordem a determinação da resistência à flexão das misturas geopoliméricas, passa a existir uma lacuna no estudo da resistência mecânica destes materiais. Desta forma, torna-se interessante obter uma relação entre a resistência à compressão, uma propriedade de fácil determinação e abordada em muitos dos trabalhos envolvendo geopolímeros, e a resistência à flexão dos mesmos.

A partir dos valores médios de resistência à flexão e compressão de cada um dos traços confeccionados neste programa experimental formou-se uma série de dados que foi plotada no gráfico mostrado na Figura 53.

Figura 53 Relação entre a resistência à flexão e compressão das pastas.



Como pode ser observado, existe uma relação linear entre a resistência à flexão e a resistência à compressão das misturas testadas. Essa relação é expressa pela equação:

$$Rf = 0,5664 \times Rc + 0,2245 \quad \text{Equação 14}$$

Onde Rf é o valor estimado de resistência à flexão da mistura (MPa) e Rc é a resistência à compressão determinada (MPa).

Vale mencionar que esta equação é uma relação obtida para as misturas confeccionadas neste trabalho e pode não ser válida para misturas contendo materiais diferentes em proporções diferentes.





## 5 CONCLUSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões obtidas através da execução do programa experimental dessa Dissertação de forma sintetizada.

Em relação aos resultados de espalhamento, os dados obtidos foram bastante satisfatórios. Porém recomenda-se que, em trabalhos futuros, ensaios complementares de reologia sejam feitos a fim de obter dados mais precisos acerca do comportamento do material no seu estado fresco.

Observou-se uma tendência ao aumento do espalhamento com o aumento da relação de massa entre solução ativadora/cinza volante (S) e com a diminuição da concentração molar da solução ativadora (M). Essas relações são justificadas pela quantidade de água presente nas misturas, que é maior em traços com relação S maior e em traços com concentração molar menor.

Quanto ao comportamento das misturas na manutenção do espalhamento, pode-se dizer que as misturas de referência tiveram um comportamento constante ao longo dos 60 minutos, com leve aumento do espalhamento nesse período de tempo em alguns casos. As misturas contendo aditivo à base de policarboxilato (PC) registraram um leve aumento no espalhamento durante os 60 minutos. E as misturas contendo aditivo à base de lignossulfonato (LS) não apresentaram uma tendência de comportamento ao longo dos 60 minutos durante os quais as misturas foram testadas.

Quanto à influência dos teores de aditivo utilizados no espalhamento, percebeu-se uma tendência ao aumento do espalhamento com o aumento do teor de aditivo quando utilizado o aditivo LS. No caso da utilização do aditivo PC, a tendência foi de redução no espalhamento com o aumento do teor utilizado.

É importante ressaltar que, dentre as misturas com solução a 12M, somente aquelas com relação S igual a 0,60 e a mistura de referência com S igual a 0,50 foram possíveis de ensaiar quanto ao espalhamento. Dentre as misturas com solução ativadora a 8M, o desempenho no espalhamento e sua manutenção foi melhor quando utilizado aditivo à base de lignossulfonato. Nestas misturas o espalhamento foi aumentado em relação à referência. O mesmo não aconteceu com o uso de policarboxilato, que prejudicou o espalhamento de todas as misturas em relação à referência. Com base nisso, conclui-se que o aditivo à base de policarboxilato não é indicado para uso nas

misturas testadas, uma vez que não cumpre sua função de fluidificar as pastas.

Sobre a avaliação da resistência mecânica, observou-se a evolução da resistência ao longo do tempo, observou-se aumento significativo da resistência à flexão e à compressão do 1º ao 28º dia, principalmente em se tratando das misturas mais secas.

Quanto à influência da relação S na resistência mecânica das misturas, observou-se uma tendência à redução da resistência à flexão e à compressão das misturas com o aumento da relação S. Tanto a resistência à flexão quanto à compressão foram mais influenciadas pelo aumento da relação S nos traços com solução ativadora a 12M.

No que diz respeito à influência da molaridade da solução na resistência mecânica, houve uma tendência ao aumento tanto da resistência à flexão quanto da resistência à compressão com o aumento da concentração da solução. Para ambas as propriedades, a ocorrência ou não de influência da concentração molar da solução dependeu da relação S das misturas. As misturas mais secas (S0,50) foram as mais afetadas.

Quanto ao efeito dos aditivos e seus teores na resistência à flexão das misturas, percebeu-se uma influência maior na resistência à flexão inicial (1 dia) das misturas do que a resistência à flexão aos 28 dias. Em se tratando da resistência à compressão, percebeu-se uma tendência ao aumento na resistência inicial com o uso do aditivo à base de policarboxilato tanto para as misturas com solução ativadora a 8M quanto a 12M. De forma que essa melhora foi observada, em alguns casos, até mesmo na resistência tardia. Já o aditivo à base de lignossulfonato, que atuou de forma positiva no espalhamento das misturas com solução a 8M, principalmente, prejudicou a resistência à compressão, reduzindo de forma significativa tanto a resistência inicial quanto a resistência tardia da maioria das misturas onde foi aplicado.

Da forma geral, levando em conta as três propriedades avaliadas (espalhamento, resistência à flexão e compressão), as misturas 8MS0,50 com 0,8% de aditivo e 8MS0,55 com 0,2% de aditivo ambos à base de lignossulfonato como as melhores misturas pelo aumento no espalhamento em relação à referência e influência positiva na resistência mecânica.

A partir dos dados de resistência à flexão e compressão foi possível obter uma relação entre as duas propriedades com a finalidade de prever, ainda que com cautela, a resistência à flexão de misturas de geopolímero a partir da determinação da sua resistência à compressão. Isso foi possível através da confecção de um gráfico utilizando os

valores médios de resistência à flexão e compressão obtidos para todos os traços confeccionados neste trabalho.

## 5.1

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da revisão bibliográfica feita no decorrer desta pesquisa e também com base nos resultados obtidos, pode-se dizer que os geopolímeros são materiais muito promissores, porém que ainda são pouco utilizados graças a uma deficiência de informações acerca do seu comportamento e desempenho mecânico. Ainda que muitos grupos de pesquisa espalhados pelo mundo estejam estudando os geopolímeros, ainda existem inúmeras lacunas que podem ser estudadas. Dessa forma sugestões são feitas para trabalhos futuros.

- a) Avaliar a estabilidade do aditivo à base de lignossulfonato em diferentes meios alcalinos procurando por mudanças na estrutura das moléculas de aditivo a fim de tentar entender seu modo de ação no material.
- b) Investigar o efeito do uso de aditivo dispersante à base de naftaleno sulfonado em comparação com o uso de lignossulfonato a fim de tentar observar diferenças no comportamento no estado fresco e endurecido da pasta.
- c) Propor um programa experimental para a análise mais aprofundada da reologia do material, investigando a influência do uso de aditivos dispersantes na viscosidade plástica e na tensão de escoamento do material.
- d) Conduzir ensaios de caracterização da matriz através de ensaios de termogravimetria e difração de raios X a fim de tentar compreender os mecanismos de ativação envolvidos na geopolimerização e seus produtos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI. **ACI 116R**: Cement and concrete terminology. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, USA, p. 73. 2000.

\_\_\_\_\_. **ACI 232.2R**: Use of fly ash in concrete. American Concrete Institute. Farmington Hills, MI, USA, p. 41. 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, ASTM. **ASTM C 125**: Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates. ASTM International. Pennsylvania, United States: 2003.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 618**: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan in concrete. ASTM International. Pennsylvania, United States, p. 3. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, p. 8. 1984.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J.G.; CHENG, Y.B. Alkali activation of Australian slag cements. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 113-120, 1999.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J.G.; CHENG, Y.B. Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1367-1374, 2000.

BRITISH STANDART, BS. **BS EN 196-1**: Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength. BS Institution. Londres, Reino Unido, p. 36. 2005.

CHINDAPRASIRT, P.; CHAREERAT, T.; SIRIVIVATNANON, V. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. **Cement & Concrete Composites**, v. 29, p. 224-229, 2007.

COLLEPARDI, M. Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 20, p. 103-112, 1998.

COLLEPARDI, M. Advances in superplasticizing admixtures. In: MAILVAGANAM, N.; JOLICOUER, C.. **Nelu Spiratos Symposium on Superplasticizer**. Bucharest, Romania: 2003.

COLLINS, F.G.; SANJAYAN, J.G. Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 607-610, 1999.

CRIADO, M.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; DE LA TORRE, A. G.; ARANDA, M. A. G.; PALOMO, A. An XRD study of the effect of the SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O ratio on the alkali activation of fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 671-679, 2007.

CRIADO, M.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; BANFILL, P.F.G. Alkali activated fly ash: effect of admixtures on paste rheology. **Rheological Acta**, v. 48, i. 4, p. 447-455, 2009.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer chemistry and properties**. In: Geopolymer '88 – First European Conference on Soft Mineralurgy, v. 1, p. 25-48. Compiegne, França. 1988.

\_\_\_\_\_. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**, v. 37, p. 1633-1656, 1991.

\_\_\_\_\_. **Properties of geopolymer cements**. In: Proceedings of the First International Conference Alkaline Cements and Concretes. Ucrânia. 1994. p.131-149.

\_\_\_\_\_. **Chemistry of geopolymeric systems, terminology**. Géopolymère '99 Conference Proceedings. Saint-Quentin: Institut Géopolymère. 1999.

\_\_\_\_\_. **30 Years of successes and failures in geopolymer applications**. Market trends and potential breakthroughs. Proceedings of Geopolymer 2002 Conference. Melbourne, Australia: Geopolymer Institute. 2002a.

\_\_\_\_\_. **Environmentally driven geopolymer cement applications**. Proceedings of Geopolymer 2002 Conference. Melbourne, Australia: Geopolymer Institute. 2002b.

\_\_\_\_\_. **Geopolymer chemistry and sustainable development**. The poly(sialate) terminology: A very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry. Proceedings of the World Congress Geopolymer, Saint Quentin, France, 2005.

\_\_\_\_\_. **Geopolymer cement: a review**. Saint-Quentin: Institut Géopolymère. 2013.

DIAZ-LOYA, E. I.; ALLOUCHE, E. N.; VAIDYA, S. Mechanical properties of fly-ash-based geopolymer concrete. **ACI Materials Journal**, v. 108, n. 3, p. 300-306, 2011.

DOUGLAS, E.; BRANDSTETR, J. A preliminary study on the alkali activation of ground granulated blast-furnace slag. **Cement and Concrete Research**, v. 20, i. 5, p. 746-756, 1990.

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J.L.; LUKEY, G.C.; PALOMO, A.; VAN DEVENTER, J.S.J. Geopolymer technology: The current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, p. 2917–2933, 2007.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Characterization of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. **Fuel**, v. 82, p. 2259–2265, 2003.

\_\_\_\_\_. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1984-1992, 2005.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; REVUELTA, D. **Alkali activation of industrial by-products to develop new earth-friendly cements**. Proceeding of the 11th International Conference on Non-Conventional Materials And Technologies (NOMAT 2009). Bath, Reino Unido: 2009.

GARCÍA-LODEIRO, I.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Alkali-activated based concrete. In: PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S.; LABRINCHA, J.; JOHN, V.M. **Eco-Efficient Concrete** - Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Cambridge, Reino Unido: Woodhead Publishing, p. 439-487, 2013.

GARTNER, E.M.; MACPHEE, D.E. A physico-chemical basis for novel cementitious binders. **Cement and Concrete Research**, v. 41, i. 7, p. 736-749, 2011.

GIANNOPOULOU, I.; PANIAS, D. **Structure, design and applications of geopolymetric materials**. In: 3rd International Conference. Deformation Processing and Structure of Materials. p. 1-8. Servia. 2007.

HARDJITO, D.; RANGAN, B. V. **Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete**. Research Report GC1. Faculty of Engineering, Curtin University of Technology. Perth, Australia. 2005.

HARDJITO, D.; WALLAH, S.E.; SUMAJOUW, D.M.J.; RANGAN, B.V. On the Development of Fly Ash-based Geopolymer Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 101, i. 6, p. 467-472, 2004.

JOLICOUER, C.; MIKANOVIC, N.; SIMARD, M.; SHARMAN, J.. **Chemical admixtures: Essential components of quality concrete**. In: MAILVAGANAM, N.; JOLICOUER, C.. Nelu Spiratos Symposium on Superplasticizer. Bucharest, Romania: 2003.

KATZ, A. Microscopic study of alkali-activated fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 2, p. 197-208, 1998.

KHALE, D.; CHAUDHARY, R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal of Materials Science**, v. 42, i. 3, p. 729-746, 2007.

KOMNITSAS K., ZAHARAKI, D. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. **Minerals Engineering**, v. 20, i. 14, p. 1261-1277, 2007.

KONG, D.L.; SANJAYAN, J.G. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, i. 2, p. 334-339, 2010.

LASKAR, A.I.; BHATTACHARJEE, R. **Effect of plasticizer and superplasticizer on workability of fly ash based geopolymer concrete**. Proceedings of International Conference on Advances in



Architecture and Civil Engineering (AARCV 2012), v.2, p. 974-977, 2012.

LIVI, C.N. **Contribuição ao desenvolvimento de geopolímeros à base de cinza volante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2013.

MARTIN, J.F.M. Aditivos para concreto. In: ISAIA, G.C. **Concreto - Ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, v.2, 2005.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MELO, L. G. D. A. **Síntese e caracterização de geopolímeros contendo filitos**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2011.

MEMON, F. A.; NARUDDIN, M.F.; DEMIE, S.; SHAFIQ, N. Effect of curing conditions on strength of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete. **Engineering and Technology**, v. 80, p. 860-863, 2011.

MONTE, R. **Avaliação de métodos de ensaio de fluidez em pastas de cimento com aditivos superplastificantes**. Boletim Técnico BT/PCC/478. Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo: EPUSP, 2008.

NEMATOLLAHI, B.; SANJAYAN, J. Effect of different superplasticizers and activator combinations. **Materials and Design**, v. 57, p. 667-672, 2014a.

NEMATOLLAHI, B.; SANJAYAN, J. Efficacy of Available Superplasticizers on Geopolymers. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 7, i. 7, p. 1278-1282, 2014b.

OLIVIA, M.; SARKER, P.; NIKRAZ, H. **Water penetrability of low calcium fly ash geopolymer concrete**. Conference on Construction and Building Technol International, 2008.

PALACIOS, M.; PUERTAS, F. Effect of superplasticizer and shrinkage-reducing admixtures on alkali-activated slag pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1358-1367, 2005.

PALOMO, A. ALONSO, S.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; SOBRADOS, I.; SANZ, J. Alkaline activation of the fly ashes: NMR study of the reaction products. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 87, p. 1141-1145, 2004.

PALOMO, A.; BLANCO-VARELA, M.T.; GRANIZO, M.L.; PUERTAS, F.; VAZQUEZ, T.; GRUTZEK, M.W. Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 997-1004, 1999.

PALOMO, A.; GRUTZEK, M. W.; BLANCO, M. T. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1323-1329, 1999.

PANIAS, D.; GIANNOPOULOU, I. P. Development of inorganic polymeric materials based on fired coal fly ash. **Acta Metallurgica Slovaca**, v. 12, p. 321 - 327, 2006.

PANIAS, D.; GIANNOPOULOU, I. P.; PERRAKI, T. Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects**, v. 301, p. 246-254, 2007.

PEREIRA, D.S.T.; SILVA, F.J.; THAUMATURGO, C. **Concreto de cimento geopolimérico reforçado com fibras de aço**. In: Anais do 50º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Blumenau: Associação Brasileira de Cerâmica. 2006.

PUERTAS, F.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; IZQUIERDO, J.D.; GRANIZO, M.L. Effect of superplasticisers on the behavior and properties of alkaline cements. **Advances in Cement Research**, v. 15, i. 1, p. 23-28, 2003.

RAMACHANDRAN, V.S.; MALHORTA, V.M.; JOLICOUER, C.; SPIRATOS, N. **Superplasticizers: Properties and applications in concrete**. Ottawa, Ontario, Canada: CANMET, 1998.

RATTANASAK, U.; PANKHET, K.; CHINDAPRASIRT, P. Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v. 18, i. 3, 364-370, 2011.

REPETTE, W. L. Concretos de última geração: presente e futuro. In: ISAIA, G.C. **Concreto – Ensino e Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, p. 633-653, 2005.

REPETTE, W. L. Cimentos Especiais de Base Mineral. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 825-862, 2010.

SANTA, R.A.A.B. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da industrial de papel**. 2012. 135 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

SATHONSAOWAPHAK, A.; CHINDAPRASIRT, P.; PIMRAKSA, K. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. **Journal of Hazardous Materials**, v. 168, p. 44-50, 2009.

SHI, C.; KRIVENKO, P. V.; ROY, D. **Alkali-activated cements and concretes**. Abingdon, UK: Taylor & Francis, 2006.

SHI, C.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 41, i. 7, 2011.

THAKUR, R. N.; GHOSH, S. Effect of mix composition on compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer composites. **ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 4, i. 4, 2009.

UCHIKAWA, H.; SAWAKI, D.; HANEHARA, S. Influence of kind and added timing of organic admixture on the composition, structure and property of fresh cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 25, p. 353-364, 1995.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J.; LORENZEN, L. Facts affecting the immobilization of metals in geopolymerized fly ash. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 29B, p. 283-291, 1998.

XU, H.; VAN DEVENTER, J. S. J. The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. **International Journal of Mineral Processing**, v. 59, p. 247-266, 2000.

\_\_\_\_\_. The effect of the alkalis metals on the formation of geopolymeric gels from alkali-feldspars. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineer Aspects**, v. 216, p. 27-44, 2003.

## APÊNDICE I: CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVA

Neste apêndice são apresentadas tabelas contendo os valores médios da massa (m), volume (V) e massa específica (ME) de todas as pastas confeccionadas no programa experimental.

Tabela 7 Características dos corpos de prova das misturas de referência (valores médios).

MISTURA	IDADE	m (g)	V (cm <sup>3</sup> )	ME (g/cm <sup>3</sup> )
8MS0,50	1D	455,82	258,37	1,77
8MS0,50	28D	455,60	255,41	1,78
8MS0,55	1D	445,28	253,73	1,75
8MS0,55	28D	456,53	262,94	1,74
8MS0,60	1D	429,62	243,96	1,76
8MS0,60	28D	438,24	252,88	1,73
12MS0,50	1D	480,06	258,41	1,86
12MS0,50	28D	472,84	256,32	1,84
12MS0,55	1D	465,94	260,82	1,79
12MS0,55	28D	475,04	257,07	1,85
12MS0,60	1D	452,78	252,83	1,79
12MS0,60	28D	464,44	250,47	1,85

Tabela 8 Características dos corpos de prova das misturas com lignossulfonato (valores médios).

MISTURA	IDADE	m (g)	V (cm <sup>3</sup> )	ME (g/cm <sup>3</sup> )
8MS0,50 0,2%	1D	432,85	255,70	1,69
8MS0,50 0,2%	28D	426,70	256,89	1,66
8MS0,50 0,8%	1D	417,94	234,61	1,78
8MS0,50 0,8%	28D	410,46	223,20	1,84
8MS0,50 1,2%	1D	428,10	258,77	1,65
8MS0,50 1,2%	28D	407,59	245,62	1,66
8MS0,55 0,2%	1D	434,79	245,60	1,77
8MS0,55 0,2%	28D	430,86	236,47	1,82
8MS0,55 0,8%	1D	437,66	247,41	1,77
8MS0,55 0,8%	28D	431,91	249,49	1,73
8MS0,55 1,2%	1D	427,41	245,54	1,74
8MS0,55 1,2%	28D	436,17	249,27	1,75
8MS0,60 0,2%	1D	431,83	255,18	1,69
8MS0,60 0,2%	28D	435,06	249,16	1,75
8MS0,60 0,8%	1D	429,58	245,25	1,75
8MS0,60 0,8%	28D	424,52	240,62	1,76
8MS0,60 1,2%	1D	430,29	246,24	1,75
8MS0,60 1,2%	28D	433,68	244,13	1,78
12MS0,50 0,2%	1D	456,05	264,99	1,72
12MS0,50 0,2%	28D	439,60	270,68	1,62
12MS0,50 0,8%	1D	453,14	268,16	1,69
12MS0,50 0,8%	28D	418,26	263,46	1,59
12MS0,50 1,2%	1D	431,72	269,09	1,60
12MS0,50 1,2%	28D	410,42	264,98	1,55
12MS0,55 0,2%	1D	443,47	265,69	1,67
12MS0,55 0,2%	28D	449,05	269,69	1,67
12MS0,55 0,8%	1D	431,07	263,40	1,64
12MS0,55 0,8%	28D	430,55	268,44	1,60
12MS0,55 1,2%	1D	419,38	263,04	1,59
12MS0,55 1,2%	28D	417,80	264,01	1,58
12MS0,60 0,2%	1D	452,06	263,84	1,71
12MS0,60 0,2%	28D	436,27	253,84	1,72
12MS0,60 0,8%	1D	441,46	262,05	1,68
12MS0,60 0,8%	28D	443,71	262,30	1,69
12MS0,60 1,2%	1D	435,17	266,85	1,63
12MS0,60 1,2%	28D	437,30	261,77	1,67

Tabela 9 Características dos corpos de prova das misturas com policarboxilato (valores médios).

MITURA	IDADE	m (g)	V (cm <sup>3</sup> )	ME (g/cm <sup>3</sup> )
8MS0,50 0,2%	1D	437,44	261,10	1,68
8MS0,50 0,2%	28D	430,48	253,90	1,70
8MS0,50 0,8%	1D	433,40	264,06	1,64
8MS0,50 0,8%	28D	420,45	254,47	1,65
8MS0,50 1,2%	1D	402,81	225,94	1,78
8MS0,50 1,2%	28D	428,73	261,09	1,64
8MS0,55 0,2%	1D	451,19	259,42	1,74
8MS0,55 0,2%	28D	451,41	257,64	1,75
8MS0,55 0,8%	1D	444,29	257,08	1,73
8MS0,55 0,8%	28D	445,90	257,27	1,73
8MS0,55 1,2%	1D	428,29	258,06	1,66
8MS0,55 1,2%	28D	443,77	255,50	1,74
8MS0,60 0,2%	1D	435,06	270,68	1,61
8MS0,60 0,2%	28D	433,07	245,65	1,76
8MS0,60 0,8%	1D	435,21	263,46	1,65
8MS0,60 0,8%	28D	415,00	239,08	1,74
8MS0,60 1,2%	1D	432,44	264,98	1,63
8MS0,60 1,2%	28D	429,81	250,13	1,72
12MS0,50 0,2%	1D	478,17	264,50	1,81
12MS0,50 0,2%	28D	459,41	255,83	1,80
12MS0,50 0,8%	1D	486,72	267,43	1,82
12MS0,50 0,8%	28D	455,78	261,46	1,74
12MS0,50 1,2%	1D	472,58	265,91	1,78
12MS0,50 1,2%	28D	456,72	263,80	1,73
12MS0,55 0,2%	1D	461,61	259,80	1,78
12MS0,55 0,2%	28D	459,44	260,27	1,77
12MS0,55 0,8%	1D	459,49	263,92	1,74
12MS0,55 0,8%	28D	456,14	262,25	1,74
12MS0,55 1,2%	1D	456,34	260,53	1,75
12MS0,55 1,2%	28D	451,59	261,50	1,73
12MS0,60 0,2%	1D	464,60	259,14	1,79
12MS0,60 0,2%	28D	463,47	258,93	1,79
12MS0,60 0,8%	1D	459,73	257,10	1,79
12MS0,60 0,8%	28D	462,04	260,39	1,77
12MS0,60 1,2%	1D	454,64	258,90	1,76
12MS0,60 1,2%	28D	453,77	260,50	1,74





## APÊNDICE II: RESULTADOS DE ESPALHAMENTO

Neste apêndice são apresentadas tabelas contendo os resultados da determinação do espalhamento e manutenção do espalhamento ao longo do tempo confeccionadas no programa experimental e seus desvios.

Tabela 10 Resultados da determinação do espalhamento das misturas e sua manutenção.

MISTURA	ESPALHAMENTO (mm)		
	0 min	30 min	60 min
8MS0,50 REF.	84,25	88,75	94
8MS0,50 LS 0,2%	82	78,25	81,75
8MS0,50 LS 0,8%	100,5	92	90,25
8MS0,50 LS 1,2%	104,75	99,75	109,5
8MS0,50 PC 0,2%	60,5	66,75	69,25
8MS0,50 PC 0,8%	59,75	62,75	68,25
8MS0,50 PC 1,2%	53,75	59,75	65,25
8MS0,55 REF.	103,5	111,5	114
8MS0,55 LS 0,2%	137,5	134,5	137
8MS0,55 LS 0,8%	149,25	148	146,75
8MS0,55 LS 1,2%	155,25	158,25	161,5
8MS0,55 PC 0,2%	76,75	86,5	87
8MS0,55 PC 0,8%	74,75	81,75	89,25
8MS0,55 PC 1,2%	67,5	73,25	88,5
8MS0,60 REF.	134,25	136	135,25
8MS0,60 LS 0,2%	147,75	145,5	153,25
8MS0,60 LS 0,8%	164,5	166,25	172
8MS0,60 LS 1,2%	171,5	169,25	167
8MS0,60 PC 0,2%	125,75	123,75	127,25
8MS0,60 PC 0,8%	136,5	137,25	139,75
8MS0,60 PC 1,2%	124,5	126	128,25
12MS0,50 REF.	0	0	0
12MS0,50 LS 0,2%	0	0	0
12MS0,50 LS 0,8%	0	0	0
12MS0,50 LS 1,2%	0	0	0
12MS0,50 PC 0,2%	0	0	0
12MS0,50 PC 0,8%	0	0	0
12MS0,50 PC 1,2%	0	0	0
12MS0,55 REF.	84	89,5	92,5
12MS0,55 LS 0,2%	0	0	0
12MS0,55 LS 0,8%	0	0	0

12MS0,5 LS 1,2%	0	0	0
12MS0,55 PC 0,2%	0	0	0
12MS0,55 PC 0,8%	0	0	0
12MS0,55 PC 1,2%	0	0	0
12MS0,60 REF.	110,75	121,5	125,75
12MS0,60 LS 0,2%	94,25	96,5	104,75
12MS0,60 LS 0,8%	98,5	107,75	117
12MS0,60 LS 1,2%	105,5	124	128,25
12MS0,60 PC 0,2%	84	86,5	93,5
12MS0,60 PC 0,8%	86	88	96
12MS0,60 PC 1,2%	89,5	95	98,5

### APÊNDICE III: RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

Neste apêndice são apresentadas tabelas contendo os valores médios de resistência à flexão e resistência à compressão referentes a todas as misturas confeccionadas no programa experimental e seus desvios.

Tabela 11 Resultados de resistência mecânica.

MISTURA	RESISTÊNCIA À FLEXÃO (MPa)				RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)			
	1 dia		28 dias		1 dia		28 dias	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
8MS0,50 REF.	1,1257	0,0605	1,8009	0,2208	3,7974	0,2964	7,3902	0,5789
8MS0,50 LS 0,2%	1,1915	0,2104	1,6937	0,2288	4,0372	0,4139	4,8528	0,3103
8MS0,50 LS 0,8%	1,5671	0,1055	2,3841	0,1642	6,0418	0,5495	7,0034	0,6433
8MS0,50 LS 1,2%	0,8530	0,1097	1,4633	0,2262	3,8453	0,3855	4,2940	0,2744
8MS0,50 PC 0,2%	1,1509	0,2277	1,4892	0,1723	4,5209	0,2270	5,8180	0,1762
8MS0,50 PC 0,8%	1,0665	0,0209	1,1996	0,0623	4,3873	0,1159	5,0538	0,5466
8MS0,50 PC 1,2%	2,5092	0,3598	1,2215	0,1046	4,3375	0,2908	4,7427	0,2387
8MS0,55 REF.	1,2620	0,1331	1,4086	0,2061	4,5763	0,3053	5,4531	0,1592
8MS0,55 LS 0,2%	1,1076	0,2607	2,2773	0,2505	4,3060	0,3089	5,8446	0,4921
8MS0,55 LS 0,8%	1,3140	0,1889	1,2421	0,3828	4,3168	0,4620	4,7766	0,4324
8MS0,55 LS 1,2%	1,2524	0,2044	1,2869	0,2864	3,5740	0,2997	4,5338	0,4751
8MS0,55 PC 0,2%	1,1152	0,1537	1,0420	0,1295	4,9842	0,7181	5,3069	0,4314
8MS0,55 PC 0,8%	1,1777	0,1114	1,5855	0,0682	5,4255	0,4400	5,5690	0,1903
8MS0,55 PC 1,2%	0,8523	0,2019	1,5055	0,0634	3,5373	0,3358	5,5370	0,2225
8MS0,60 REF.	0,8817	0,3867	1,2587	0,0260	4,6708	0,3898	5,1595	0,4427
8MS0,60 LS 0,2%	0,7439	0,1313	1,0417	0,2064	3,0558	0,1099	4,3032	0,2111
8MS0,60 LS 0,8%	0,7694	0,1418	1,1368	0,1932	2,5129	0,2206	4,4224	0,1161
8MS0,60 LS 1,2%	0,9606	0,1877	1,3640	0,1192	3,2336	0,1273	3,4389	0,1188

8MS0,60 PC 0,2%	0,8340	0,1738	1,3454	0,0598	4,9842	0,7181	5,2488	0,4543
8MS0,60 PC 0,8%	1,1136	0,0328	0,8306	0,2279	5,5195	0,3750	5,5690	0,1903
8MS0,60 PC 1,2%	0,8747	0,1359	1,2343	0,2878	3,5373	0,3358	5,5370	0,2225
12MS0,50 REF.	0,7581	0,0023	2,1758	0,2005	6,2100	0,1899	13,9901	0,7351
12MS0,50 LS 0,2%	1,4490	0,2619	1,8148	0,2216	8,0145	0,4238	10,4221	0,4509
12MS0,50 LS 0,8%	1,1628	0,2352	2,0784	0,0193	6,8232	0,4962	8,9603	0,7072
12MS0,50 LS 1,2%	1,3392	0,1284	1,9057	0,2153	5,4833	0,4574	7,9834	0,2254
12MS0,50 PC 0,2%	1,4456	0,1522	2,3708	0,1491	9,7161	0,3548	13,5277	0,5461
12MS0,50 PC 0,8%	1,8251	0,1070	2,1903	0,1048	9,4755	0,3948	11,9419	0,2207
12MS0,50 PC 1,2%	1,8114	0,0475	2,7551	0,1092	7,4069	0,6855	11,4446	0,2588
12MS0,55 REF.	0,7906	0,1419	1,4718	0,0494	4,8560	0,2999	8,7056	0,9504
12MS0,55 LS 0,2%	0,9592	0,2632	1,6549	0,0777	4,6109	0,2865	8,7862	0,4769
12MS0,55 LS 0,8%	0,9932	0,1783	1,6460	0,1141	4,0290	0,1922	7,8533	0,2692
12MS0,55 LS 1,2%	0,8690	0,0503	1,3983	0,0997	3,3928	0,1524	6,9548	0,3454
12MS0,55 PC 0,2%	0,9333	0,1117	1,7975	0,2236	4,9508	0,2344	9,4627	0,3289
12MS0,55 PC 0,8%	1,2251	0,0577	1,3511	0,0811	4,9820	0,1505	7,5531	0,3832
12MS0,55 PC 1,2%	1,2249	0,0081	1,1136	0,1697	4,9971	0,1367	9,6553	0,5982
12MS0,60 REF.	0,6005	0,1048	1,6230	0,1961	3,5122	0,2162	8,8662	0,6672
12MS0,60 LS 0,2%	0,8653	0,1217	1,1007	0,1631	3,2388	0,0589	6,1641	0,2834
12MS0,60 LS 0,8%	0,9636	0,2071	1,2046	0,1340	3,0264	0,1183	5,9946	0,3147
12MS0,60 LS 1,2%	0,8057	0,1675	1,4583	0,1933	2,6192	0,1368	5,7914	0,1705
12MS0,60 PC 0,2%	0,7439	0,0205	1,2726	0,2479	3,2486	0,1034	8,1438	0,3309
12MS0,60 PC 0,8%	0,8495	0,1384	1,5658	0,2624	3,3734	0,2636	7,0650	0,1838
12MS0,60 PC 1,2%	0,9983	0,3413	1,3011	0,2166	3,8034	0,1152	6,5136	0,2468

## APÊNDICE IV: RESUMO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA

Neste apêndice são apresentadas as tabelas contendo os resultados da análise estatística envolvendo os resultados de resistência à flexão e compressão de forma resumida.

### RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Tabela 12 Resumo da análise estatística referente à influência da idade na resistência à flexão.

MISTURAS		SIGNIFICÂNCIA	
		P	Resumo
8MS0,50 REF. 1 dia	8MS0,50 REF. 28 dias	P < 0,01	**
8MS0,50 LS 0,2% 1 dia	8MS0,50 LS 0,2% 28 dias	P < 0,05	*
8MS0,50 LS 0,8% 1 dia	8MS0,50 LS 0,8% 28 dias	P < 0,01	**
8MS0,50 LS 1,2% 1 dia	8MS0,50 LS 1,2% 28 dias	P < 0,01	**
8MS0,50 PC 0,2% 1 dia	8MS0,50 PC 0,2% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,50 PC 0,8% 1 dia	8MS0,50 PC 0,8% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,50 PC 1,2% 1 dia	8MS0,50 PC 1,2% 28 dias	P < 0,01	**
8MS0,55 REF. 1 dia	8MS0,55 REF. 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,55 LS 0,2% 1 dia	8MS0,55 LS 0,2% 28 dias	P < 0,01	**
8MS0,55 LS 0,8% 1 dia	8MS0,55 LS 0,8% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,55 LS 1,2% 1 dia	8MS0,55 LS 1,2% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,55 PC 0,2% 1 dia	8MS0,55 PC 0,2% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,55 PC 0,8% 1 dia	8MS0,55 PC 0,8% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,55 PC 1,2% 1 dia	8MS0,55 PC 1,2% 28 dias	P < 0,01	**
8MS0,60 REF. 1 dia	8MS0,60 REF. 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,60 LS 0,2% 1 dia	8MS0,60 LS 0,2% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,60 LS 0,8% 1 dia	8MS0,60 LS 0,8% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,60 LS 1,2% 1 dia	8MS0,60 LS 1,2% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,60 PC 0,2% 1 dia	8MS0,60 PC 0,2% 28 dias	P < 0,05	*
8MS0,60 PC 0,8% 1 dia	8MS0,60 PC 0,8% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,60 PC 1,2% 1 dia	8MS0,60 PC 1,2% 28 dias	P > 0,05	ns
12MS0,50 REF. 1 dia	12MS0,50 REF. 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,50 LS 0,2% 1 dia	12MS0,50 LS 0,2% 28 dias	P > 0,05	ns
12MS0,50 LS 0,8% 1 dia	12MS0,50 LS 0,8% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,50 LS 1,2% 1 dia	12MS0,50 LS 1,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,50 PC 0,2% 1 dia	12MS0,50 PC 0,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,50 PC 0,8% 1 dia	12MS0,50 PC 0,8% 28 dias	P > 0,05	ns
12MS0,50 PC 1,2% 1 dia	12MS0,50 PC 1,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,55 REF. 1 dia	12MS0,55 REF. 28 dias	P < 0,01	**

12MS0,55 LS 0,2% 1 dia	12MS0,55 LS 0,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,55 LS 0,8% 1 dia	12MS0,55 LS 0,8% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,55 LS 1,2% 1 dia	12MS0,55 LS 1,2% 28 dias	P < 0,05	*
12MS0,55 PC 0,2% 1 dia	12MS0,55 PC 0,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,55 PC 0,8% 1 dia	12MS0,55 PC 0,8% 28 dias	P > 0,05	ns
12MS0,55 PC 1,2% 1 dia	12MS0,55 PC 1,2% 28 dias	P > 0,05	ns
12MS0,60 REF. 1 dia	12MS0,60 REF. 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,60 LS 0,2% 1 dia	12MS0,60 LS 0,2% 28 dias	P > 0,05	ns
12MS0,60 LS 0,8% 1 dia	12MS0,60 LS 0,8% 28 dias	P > 0,05	ns
12MS0,60 LS 1,2% 1 dia	12MS0,60 LS 1,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,60 PC 0,2% 1 dia	12MS0,60 PC 0,2% 28 dias	P > 0,05	ns
12MS0,60 PC 0,8% 1 dia	12MS0,60 PC 0,8% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,60 PC 1,2% 1 dia	12MS0,60 PC 1,2% 28 dias	P > 0,05	ns

Legenda: ns – não significativo; \* - significativo; \*\* - muito significativo.

Tabela 13 Resumo da análise estatística referente à influência do tipo e teor de aditivo na resistência à flexão.

MISTURAS		SIGNIFICÂNCIA			
		1 dia		28 dias	
		P	Resumo	P	Resumo
8MS0,50 REF.	8MS0,50 LS 0,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,50 REF.	8MS0,50 LS 0,8%	P < 0,05	*	P < 0,01	**
8MS0,50 REF.	8MS0,50 LS 1,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,50 REF.	8MS0,50 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,50 REF.	8MS0,50 PC 0,8%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
8MS0,50 REF.	8MS0,50 PC 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,55 REF.	8MS0,55 LS 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
8MS0,55 REF.	8MS0,55 LS 0,8%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,55 REF.	8MS0,55 LS 1,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,55 REF.	8MS0,55 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,55 REF.	8MS0,55 PC 0,8%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,55 REF.	8MS0,55 PC 1,2%	P < 0,05	*	P > 0,05	ns
8MS0,60 REF.	8MS0,60 LS 0,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,60 REF.	8MS0,60 LS 0,8%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,60 REF.	8MS0,60 LS 1,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,60 REF.	8MS0,60 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,60 REF.	8MS0,60 PC 0,8%	P > 0,05	ns	P < 0,05	*
8MS0,60 REF.	8MS0,60 PC 1,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
12MS0,50 REF.	12MS0,50 LS 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,05	*
12MS0,50 REF.	12MS0,50 LS 0,8%	P < 0,05	*	P > 0,05	ns
12MS0,50 REF.	12MS0,50 LS 1,2%	P < 0,01	**	P > 0,05	ns
12MS0,50 REF.	12MS0,50 PC 0,2%	P < 0,01	**	P > 0,05	ns
12MS0,50 REF.	12MS0,50 PC 0,8%	P < 0,01	**	P > 0,05	ns
12MS0,50 REF.	12MS0,50 PC 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,55 REF.	12MS0,55 LS 0,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
12MS0,55 REF.	12MS0,55 LS 0,8%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
12MS0,55 REF.	12MS0,55 LS 1,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
12MS0,55 REF.	12MS0,55 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,05	*
12MS0,55 REF.	12MS0,55 PC 0,8%	P < 0,05	*	P > 0,05	ns
12MS0,55 REF.	12MS0,55 PC 1,2%	P < 0,05	*	P < 0,05	*
12MS0,60 REF.	12MS0,60 LS 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
12MS0,60 REF.	12MS0,60 LS 0,8%	P > 0,05	ns	P < 0,05	*
12MS0,60 REF.	12MS0,60 LS 1,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
12MS0,60 REF.	12MS0,60 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
12MS0,60 REF.	12MS0,60 PC 0,8%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
12MS0,60 REF.	12MS0,60 PC 1,2%	P < 0,05	*	P > 0,05	ns

Legenda: ns – não significativo; \* - significativo; \*\* - muito significativo.

Tabela 14 Resumo da análise estatística referente à influência da relação de massa entre a solução ativadora e a cinza volante (S) na resistência à flexão.

MISTURAS		SIGNIFICÂNCIA			
		1 dia		28 dias	
		P	Resumo	P	Resumo
8MS0,50 REF.	8MS0,55 REF.	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,50 REF.	8MS0,60 REF.	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,55 REF.	8MS0,60 REF.	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,50 LS 0,2%	8MS0,55 LS 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
8MS0,50 LS 0,2%	8MS0,60 LS 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,05	*
8MS0,55 LS 0,2%	8MS0,60 LS 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,50 LS 0,8%	8MS0,55 LS 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,50 LS 0,8%	8MS0,60 LS 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,55 LS 0,8%	8MS0,60 LS 0,8%	P < 0,01	**	P > 0,05	ns
8MS0,50 LS 1,2%	8MS0,55 LS 1,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,50 LS 1,2%	8MS0,60 LS 1,2%	P < 0,05	*	P < 0,01	**
8MS0,55 LS 1,2%	8MS0,60 LS 1,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
8MS0,50 PC 0,2%	8MS0,55 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,05	*
8MS0,50 PC 0,2%	8MS0,60 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,05	*
8MS0,55 PC 0,2%	8MS0,60 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,50 PC 0,8%	8MS0,55 PC 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,05	*
8MS0,50 PC 0,8%	8MS0,60 PC 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,05	*
8MS0,55 PC 0,8%	8MS0,60 PC 0,8%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,50 PC 1,2%	8MS0,55 PC 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,50 PC 1,2%	8MS0,60 PC 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,55 PC 1,2%	8MS0,60 PC 1,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
12MS0,50 REF.	12MS0,55 REF.	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,50 REF.	12MS0,60 REF.	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,55 REF.	12MS0,60 REF.	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
12MS0,50 LS 0,2%	12MS0,55 LS 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
12MS0,50 LS 0,2%	12MS0,60 LS 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,05	*
12MS0,55 LS 0,2%	12MS0,60 LS 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,50 LS 0,8%	12MS0,55 LS 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,50 LS 0,8%	12MS0,60 LS 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,55 LS 0,8%	12MS0,60 LS 0,8%	P < 0,01	**	P > 0,05	ns
12MS0,50 LS 1,2%	12MS0,55 LS 1,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
12MS0,50 LS 1,2%	12MS0,60 LS 1,2%	P < 0,05	*	P < 0,01	**
12MS0,55 LS 1,2%	12MS0,60 LS 1,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
12MS0,50 PC 0,2%	12MS0,55 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,05	*
12MS0,50 PC 0,2%	12MS0,60 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,05	*
12MS0,55 PC 0,2%	12MS0,60 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
12MS0,50 PC 0,8%	12MS0,55 PC 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,05	*



12MS0,50 PC 0,8%	12MS0,60 PC 0,8%	$P < 0,01$	**	$P < 0,05$	*
12MS0,55 PC 0,8%	12MS0,60 PC 0,8%	$P > 0,05$	ns	$P > 0,05$	ns
12MS0,50 PC 1,2%	12MS0,55 PC 1,2%	$P < 0,01$	**	$P < 0,01$	**
12MS0,50 PC 1,2%	12MS0,60 PC 1,2%	$P < 0,01$	**	$P < 0,01$	**
12MS0,55 PC 1,2%	12MS0,60 PC 1,2%	$P > 0,05$	ns	$P > 0,05$	ns

Legenda: ns – não significativo; \* - significativo; \*\* - muito significativo.

Tabela 15 Resumo da análise estatística referente à influência da concentração molar da solução ativadora (M) na resistência à flexão.

MISTURAS		SIGNIFICÂNCIA			
		1 dia		28 dias	
		P	Resumo	P	Resumo
8MS0,50 REF.	12MS0,50 REF.	P < 0,05	*	P < 0,05	*
8MS0,50 LS 0,2%	12MS0,50 LS 0,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,50 LS 0,8%	12MS0,50 LS 0,8%	P < 0,05	*	P > 0,05	ns
8MS0,50 LS 1,2%	12MS0,50 LS 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,50 PC 0,2%	12MS0,50 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
8MS0,50 PC 0,8%	12MS0,50 PC 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,50 PC 1,2%	12MS0,50 PC 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,55 REF.	12MS0,55 REF.	P < 0,01	**	P > 0,05	ns
8MS0,55 LS 0,2%	12MS0,55 LS 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
8MS0,55 LS 0,8%	12MS0,55 LS 0,8%	P > 0,05	ns	P < 0,05	*
8MS0,55 LS 1,2%	12MS0,55 LS 1,2%	P < 0,05	*	P > 0,05	ns
8MS0,55 PC 0,2%	12MS0,55 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
8MS0,55 PC 0,8%	12MS0,55 PC 0,8%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,55 PC 1,2%	12MS0,55 PC 1,2%	P < 0,05	*	P < 0,05	*
8MS0,60 REF.	12MS0,60 REF.	P > 0,05	ns	P < 0,05	*
8MS0,60 LS 0,2%	12MS0,60 LS 0,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,60 LS 0,8%	12MS0,60 LS 0,8%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,60 LS 1,2%	12MS0,60 LS 1,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,60 PC 0,2%	12MS0,60 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,60 PC 0,8%	12MS0,60 PC 0,8%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
8MS0,60 PC 1,2%	12MS0,60 PC 1,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns

Legenda: ns – não significativo; \* - significativo; \*\* - muito significativo.

## RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tabela 16 Resumo da análise estatística referente à influência da idade na resistência à compressão.

MISTURAS		SIGNIFICÂNCIA	
		P	Resumo
8MS0,50 REF. 1 dia	8MS0,50 REF. 28 dias	P < 0,01	**
8MS0,50 LS 0,2% 1 dia	8MS0,50 LS 0,2% 28 dias	P < 0,05	*
8MS0,50 LS 0,8% 1 dia	8MS0,50 LS 0,8% 28 dias	P < 0,01	**
8MS0,50 LS 1,2% 1 dia	8MS0,50 LS 1,2% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,50 PC 0,2% 1 dia	8MS0,50 PC 0,2% 28 dias	P < 0,01	**
8MS0,50 PC 0,8% 1 dia	8MS0,50 PC 0,8% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,50 PC 1,2% 1 dia	8MS0,50 PC 1,2% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,55 REF. 1 dia	8MS0,55 REF. 28 dias	P < 0,05	*
8MS0,55 LS 0,2% 1 dia	8MS0,55 LS 0,2% 28 dias	P < 0,01	**
8MS0,55 LS 0,8% 1 dia	8MS0,55 LS 0,8% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,55 LS 1,2% 1 dia	8MS0,55 LS 1,2% 28 dias	P < 0,01	**
8MS0,55 PC 0,2% 1 dia	8MS0,55 PC 0,2% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,55 PC 0,8% 1 dia	8MS0,55 PC 0,8% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,55 PC 1,2% 1 dia	8MS0,55 PC 1,2% 28 dias	P < 0,01	**
8MS0,60 REF. 1 dia	8MS0,60 REF. 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,60 LS 0,2% 1 dia	8MS0,60 LS 0,2% 28 dias	P < 0,01	**
8MS0,60 LS 0,8% 1 dia	8MS0,60 LS 0,8% 28 dias	P < 0,01	**
8MS0,60 LS 1,2% 1 dia	8MS0,60 LS 1,2% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,60 PC 0,2% 1 dia	8MS0,60 PC 0,2% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,60 PC 0,8% 1 dia	8MS0,60 PC 0,8% 28 dias	P > 0,05	ns
8MS0,60 PC 1,2% 1 dia	8MS0,60 PC 1,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,50 REF. 1 dia	12MS0,50 REF. 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,50 LS 0,2% 1 dia	12MS0,50 LS 0,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,50 LS 0,8% 1 dia	12MS0,50 LS 0,8% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,50 LS 1,2% 1 dia	12MS0,50 LS 1,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,50 PC 0,2% 1 dia	12MS0,50 PC 0,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,50 PC 0,8% 1 dia	12MS0,50 PC 0,8% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,50 PC 1,2% 1 dia	12MS0,50 PC 1,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,55 REF. 1 dia	12MS0,55 REF. 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,55 LS 0,2% 1 dia	12MS0,55 LS 0,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,55 LS 0,8% 1 dia	12MS0,55 LS 0,8% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,55 LS 1,2% 1 dia	12MS0,55 LS 1,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,55 PC 0,2% 1 dia	12MS0,55 PC 0,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,55 PC 0,8% 1 dia	12MS0,55 PC 0,8% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,55 PC 1,2% 1 dia	12MS0,55 PC 1,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,60 REF. 1 dia	12MS0,60 REF. 28 dias	P < 0,01	**

12MS0,60 LS 0,2% 1 dia	12MS0,60 LS 0,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,60 LS 0,8% 1 dia	12MS0,60 LS 0,8% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,60 LS 1,2% 1 dia	12MS0,60 LS 1,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,60 PC 0,2% 1 dia	12MS0,60 PC 0,2% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,60 PC 0,8% 1 dia	12MS0,60 PC 0,8% 28 dias	P < 0,01	**
12MS0,60 PC 1,2% 1 dia	12MS0,60 PC 1,2% 28 dias	P < 0,01	**

---

Legenda: ns – não significativo; \* - significativo; \*\* - muito significativo.

Tabela 17 Resumo da análise estatística referente à influência do tipo e teor de aditivo na resistência à compressão.

MISTURAS		SIGNIFICÂNCIA			
		1 dia		28 dias	
		P	Resumo	P	Resumo
8MS0,50 REF.	8MS0,50 LS 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
8MS0,50 REF.	8MS0,50 LS 0,8%	P < 0,01	**	P > 0,05	ns
8MS0,50 REF.	8MS0,50 LS 1,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
8MS0,50 REF.	8MS0,50 PC 0,2%	P < 0,05	*	P < 0,01	**
8MS0,50 REF.	8MS0,50 PC 0,8%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
8MS0,50 REF.	8MS0,50 PC 1,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
8MS0,55 REF.	8MS0,55 LS 0,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,55 REF.	8MS0,55 LS 0,8%	P > 0,05	ns	P < 0,05	*
8MS0,55 REF.	8MS0,55 LS 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,55 REF.	8MS0,55 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,55 REF.	8MS0,55 PC 0,8%	P < 0,01	**	P > 0,05	ns
8MS0,55 REF.	8MS0,55 PC 1,2%	P < 0,01	**	P > 0,05	ns
8MS0,60 REF.	8MS0,60 LS 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,60 REF.	8MS0,60 LS 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,60 REF.	8MS0,60 LS 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,60 REF.	8MS0,60 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,60 REF.	8MS0,60 PC 0,8%	P < 0,01	**	P > 0,05	ns
8MS0,60 REF.	8MS0,60 PC 1,2%	P < 0,01	**	P > 0,05	ns
12MS0,50 REF.	12MS0,50 LS 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,50 REF.	12MS0,50 LS 0,8%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
12MS0,50 REF.	12MS0,50 LS 1,2%	P < 0,05	*	P < 0,01	**
12MS0,50 REF.	12MS0,50 PC 0,2%	P < 0,01	**	P > 0,05	ns
12MS0,50 REF.	12MS0,50 PC 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,50 REF.	12MS0,50 PC 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,55 REF.	12MS0,55 LS 0,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
12MS0,55 REF.	12MS0,55 LS 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,55 REF.	12MS0,55 LS 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,55 REF.	12MS0,55 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
12MS0,55 REF.	12MS0,55 PC 0,8%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
12MS0,55 REF.	12MS0,55 PC 1,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
12MS0,60 REF.	12MS0,60 LS 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
12MS0,60 REF.	12MS0,60 LS 0,8%	P < 0,05	*	P < 0,01	**
12MS0,60 REF.	12MS0,60 LS 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,60 REF.	12MS0,60 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
12MS0,60 REF.	12MS0,60 PC 0,8%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
12MS0,60 REF.	12MS0,60 PC 1,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**

Legenda: ns – não significativo; \* - significativo; \*\* - muito significativo.

Tabela 18 Resumo da análise estatística referente à influência da relação de massa entre a solução ativadora e a cinza volante (S) na resistência à compressão.

MISTURAS		SIGNIFICÂNCIA			
		1 dia		28 dias	
		P	Resumo	P	Resumo
8MS0,50 REF.	8MS0,55 REF.	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,50 REF.	8MS0,60 REF.	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,55 REF.	8MS0,60 REF.	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,50 LS 0,2%	8MS0,55 LS 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
8MS0,50 LS 0,2%	8MS0,60 LS 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,05	*
8MS0,55 LS 0,2%	8MS0,60 LS 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,50 LS 0,8%	8MS0,55 LS 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,50 LS 0,8%	8MS0,60 LS 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,55 LS 0,8%	8MS0,60 LS 0,8%	P < 0,01	**	P > 0,05	ns
8MS0,50 LS 1,2%	8MS0,55 LS 1,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,50 LS 1,2%	8MS0,60 LS 1,2%	P < 0,05	*	P < 0,01	**
8MS0,55 LS 1,2%	8MS0,60 LS 1,2%	P > 0,05	ns	P < 0,01	**
8MS0,50 PC 0,2%	8MS0,55 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,05	*
8MS0,50 PC 0,2%	8MS0,60 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P < 0,05	*
8MS0,55 PC 0,2%	8MS0,60 PC 0,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,50 PC 0,8%	8MS0,55 PC 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,05	*
8MS0,50 PC 0,8%	8MS0,60 PC 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,05	*
8MS0,55 PC 0,8%	8MS0,60 PC 0,8%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
8MS0,50 PC 1,2%	8MS0,55 PC 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,50 PC 1,2%	8MS0,60 PC 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,55 PC 1,2%	8MS0,60 PC 1,2%	P > 0,05	ns	P > 0,05	ns
12MS0,50 REF.	12MS0,55 REF.	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,50 REF.	12MS0,60 REF.	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,55 REF.	12MS0,60 REF.	P < 0,01	**	P > 0,05	ns
12MS0,50 LS 0,2%	12MS0,55 LS 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,50 LS 0,2%	12MS0,60 LS 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,55 LS 0,2%	12MS0,60 LS 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,50 LS 0,8%	12MS0,55 LS 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,50 LS 0,8%	12MS0,60 LS 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,55 LS 0,8%	12MS0,60 LS 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,50 LS 1,2%	12MS0,55 LS 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,50 LS 1,2%	12MS0,60 LS 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,55 LS 1,2%	12MS0,60 LS 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,50 PC 0,2%	12MS0,55 PC 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,50 PC 0,2%	12MS0,60 PC 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,55 PC 0,2%	12MS0,60 PC 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,50 PC 0,8%	12MS0,55 PC 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**

12MS0,50 PC 0,8%	12MS0,60 PC 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,55 PC 0,8%	12MS0,60 PC 0,8%	P < 0,01	**	P > 0,05	ns
12MS0,50 PC 1,2%	12MS0,55 PC 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,50 PC 1,2%	12MS0,60 PC 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
12MS0,55 PC 1,2%	12MS0,60 PC 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**

Legenda: ns – não significativo; \* - significativo; \*\* - muito significativo.

Tabela 19 Resumo da análise estatística referente à influência da concentração molar da solução ativadora (M) na resistência à compressão.

MISTURAS		SIGNIFICÂNCIA			
		1 dia		28 dias	
		P	Resumo	P	Resumo
8MS0,50 REF.	12MS0,50 REF.	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,50 LS 0,2%	12MS0,50 LS 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,50 LS 0,8%	12MS0,50 LS 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,50 LS 1,2%	12MS0,50 LS 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,50 PC 0,2%	12MS0,50 PC 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,50 PC 0,8%	12MS0,50 PC 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,50 PC 1,2%	12MS0,50 PC 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,55 REF.	12MS0,55 REF.	P < 0,01	ns	P < 0,01	**
8MS0,55 LS 0,2%	12MS0,55 LS 0,2%	P < 0,01	ns	P < 0,01	**
8MS0,55 LS 0,8%	12MS0,55 LS 0,8%	P < 0,01	ns	P < 0,01	**
8MS0,55 LS 1,2%	12MS0,55 LS 1,2%	P < 0,01	ns	P < 0,01	**
8MS0,55 PC 0,2%	12MS0,55 PC 0,2%	P < 0,01	ns	P < 0,01	**
8MS0,55 PC 0,8%	12MS0,55 PC 0,8%	P < 0,01	ns	P < 0,01	**
8MS0,55 PC 1,2%	12MS0,55 PC 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,60 REF.	12MS0,60 REF.	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,60 LS 0,2%	12MS0,60 LS 0,2%	P < 0,01	ns	P < 0,01	**
8MS0,60 LS 0,8%	12MS0,60 LS 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,60 LS 1,2%	12MS0,60 LS 1,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,60 PC 0,2%	12MS0,60 PC 0,2%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,60 PC 0,8%	12MS0,60 PC 0,8%	P < 0,01	**	P < 0,01	**
8MS0,60 PC 1,2%	12MS0,60 PC 1,2%	P < 0,01	ns	P < 0,01	**

Legenda: ns – não significativo; \* - significativo; \*\* - muito significativo.